

Rede de Tração de Troleicarros da Cidade de Coimbra: Melhoria da Eficiência Energética, Propostas e sua Viabilidade Técnico-económica

Relatório de Projeto para a obtenção do grau de Mestre em Automação e
Comunicações em Sistemas de Energia

Autor

Pedro Filipe de Almeida Mota dos Santos

Orientadores

Prof. Doutor Paulo Pereirinha

Instituto Superior de Engenharia de Coimbra

Prof. Doutor João Pedro Trovão

Instituto Superior de Engenharia de Coimbra

Coimbra, Dezembro de 2013

Rede de Tração de Troleicarros da Cidade de Coimbra: Melhoria da Eficiência Energética, Propostas e sua Viabilidade Técnico-económica

Relatório de Projeto para a obtenção do grau de Mestre em Automação e
Comunicações em Sistemas de Energia

Autor

Pedro Filipe de Almeida Mota dos Santos

Orientadores

Prof. Doutor Paulo Pereirinha

Instituto Superior de Engenharia de Coimbra

Prof. Doutor João Pedro Trovão

Instituto Superior de Engenharia de Coimbra

Coimbra, Dezembro de 2013

AGRADECIMENTOS

Este trabalho, sem a ajuda e a colaboração que tive de determinadas pessoas, não teria sido possível efetuar-se. A todas elas quero expressar profundamente o meu sincero e eterno agradecimento. Agradeço assim:

aos meus orientadores, Prof. Doutor Paulo Pereirinha e Prof. Doutor João Pedro Trovão, pela forma como orientaram este trabalho, pela paciência tida, pela total disponibilidade demonstrada, pelo seu incentivo e motivação;

aos SMTUC, na pessoa no Eng^o Luiz Arthur, e a todos os seus colaboradores, pela forma eficiente como deram resposta aos meus pedidos e solicitações;

ao Prof. Doutor Victor Santos e ao Prof. Carlos Lebres do Departamento de Engenharia Eletrotécnica do ISEC, pela sua colaboração e ajuda,

à *rapaziada* do Laboratório de Acionamentos Eletromecânicos na ajuda na implementação dos *Ampop's* e na monitorização efetuada a bordo das viaturas troleicarro;

à EFACEC e à ABB (Delegação de Coimbra) respetivamente, na pessoa do Eng.^o Ricardo Magalhães e ao Eng^o Carlos Vasco e Eng^o Paulo Barbosa, pela colaboração prestada;

ao Projeto MESMO-EV: Multiple Energy Storage Systems Management Optimization for Electric Vehicles (PTDC/EEA-EEL/121284/2010 e FCOM-01-0124-FEDER-020391), financiado pela FCT e pelo programa COMPLETE pelo enquadramento e apoio ao presente trabalho;

a todos os meus amigos, incluindo aos casais amigos da ENS45, pela motivação transmitida;

ao amigo Emanuel Paulino, pela força que interiormente ao longo deste tempo sempre me transmitiu;

ao Heleno Grilo e à Ana Filipa Santos, cuja a ajuda e colaboração na revisão de todo o texto foi crucial para a exequibilidade deste documento;

à minha irmã Lília, aos meus cunhados Marco, Pedro e Eve, pelo incentivo e perseverança;

aos meus sogros pelo apoio e compreensão;

aos meus pais, por terem sido uns verdadeiros Mestres na minha educação e que fizeram de mim a pessoa que sou hoje;

ao meu filho “Pipe” e à minha esposa Beta, pelo amor, compreensão, solidariedade e paciência que sempre demonstraram ter para comigo;

e finalmente a Ele, por tudo o que tem feito na minha vida e que me faz acreditar todos os dias que nada é por acaso.

O Milagre da Vida

*Pode ser que um dia deixemos de nos falar...
Mas, enquanto houver amizade,
Faremos as pazes de novo.*

*Pode ser que um dia o tempo passe...
Mas, se a amizade permanecer,
Um de outro se há de lembrar.*

*Pode ser que um dia nos afastemos...
Mas, se formos amigos de verdade,
A amizade nos reaproximará.*

*Pode ser que um dia não mais existamos...
Mas, se ainda sobrar amizade,
Nascemos de novo, um para o outro.*

*Pode ser que um dia tudo acabe...
Mas, com a amizade construiremos tudo novamente,
Cada vez de forma diferente.
Sendo único e inesquecível cada momento
Que juntos viveremos e nos lembraremos para sempre.*

*Há duas formas para viver a sua vida:
Uma é acreditar que não existe milagre.
A outra é acreditar que todas as coisas são um milagre.*

Albert Einstein

RESUMO

Coimbra é a cidade da península ibérica em que algumas viaturas troleicarro ainda se encontram ao serviço do seu sistema de transportes urbanos. Para poderem operar, os troleicarros necessitam de uma infraestrutura de alimentação de energia composta por subestações retificadoras e por linhas aéreas, denominadas por rede de tração. Muitos dos equipamentos desta infraestrutura são de meados do século passado e não foram projetados com as atuais preocupações energéticas. As subestações retificadoras apresentam-se como fundamentais para um funcionamento eficiente e sustentável de um sistema de transporte que utiliza troleicarros. Com vista a tornar este sistema mais sustentável quer ambientalmente quer financeiramente este trabalho propõe-se identificar soluções que permitam equacionar alternativas aos equipamentos de retificação existentes. Neste sentido este trabalho está dividido sucintamente em duas partes. A primeira enquadra a legislação aplicável à eficiência energética no setor dos transportes e a ligação histórica que a cidade de Coimbra tem com a mobilidade elétrica. É apresentada o estado da arte das viaturas troleicarro e identificam-se algumas abordagens com vista a torná-las mais eficientes. Apresentam-se os sistemas de retificação/conversão AC-DC disponíveis e suas características mais importantes, ao nível da eficiência energética e da qualidade de energia. A segunda parte descreve o sistema de troleicarros existente na cidade, as linhas atualmente em serviço, as suas características e analisam-se os equipamentos de retificação existentes. Seguidamente são estudadas as solicitações de serviço das subestações, relativamente ao regime transitório e potências médias solicitadas diariamente, obtidas por monitorização. As monitorizações foram fundamentais para aferir os parâmetros de eficiência e de distorção harmónica de cada uma das subestações. Complementarmente realizou-se uma análise de custos energéticos de cada uma das subestações e referentes a um ano de consumo de energia elétrica, com base nas faturas emitidas pelo comercializador. Estes dados permitiram dimensionar novos sistemas de retificação, adaptados à realidade atual deste sistema de troleicarros. Finalmente, e numa altura em que cada investimento tem de ser criteriosamente analisado, deixa-se uma análise técnico-económica aos investimentos necessários para maximizar a eficiência energética das subestações. Para isso, foram equacionados diversos planos de investimentos e discutidas três medidas a implementar. A implementação de qualquer uma destas medidas permitirá diminuir os encargos financeiros com o custo da energia elétrica necessário ao funcionamento das duas linhas de troleicarros. Os tempos de retorno dos diferentes investimentos situam-se entre os três e os cinco anos, o que comparativamente com a vida útil deste tipo de equipamentos é francamente um valor muito residual.

Palavras-Chave – *Eficiência Energética, Mobilidade Sustentável, Troleicarros, Sistemas de Retificação*

ABSTRACT

Coimbra's urban transport system is the oldest system with trolleybuses currently still in service at the Iberian Peninsula. In order to operate trolleybuses a power supply infrastructure is needed. This infrastructure is composed mainly by rectifier substations and overhead lines. Some of these infrastructure facilities date back to the middle of the twentieth century and were not designed for today's energy concerns or energy-efficiency. The rectifier substations are presented as fundamental to an efficient and sustainable operation of a transportation system that uses trolleybuses. In order to enable this system to become more environmentally and financially sustainable, this paper aims to identify solutions that allow replacement of the existing equipment. To that effect this paper is divided into two parts. The first presents the applicable energy efficiency legislation in the transport sector and Coimbra's historical connection to electric mobility. The trolleybus vehicles condition is presented and some approaches are identified to make them more efficient. The rectifying and conversion AC-DC available systems and its most important features, such as energy efficiency and power quality, are also presented. The second part not only describes the existing system of trolleybuses in the city, the lines currently in service, and their features but it also analyses the existing rectifying equipment. Then, service requests substations are studied, in relation to the transitional regime and daily requested medium powers, obtained by monitoring. Monitoring has revealed itself an important key feature in order to measure the efficiency and harmonic distortion of each substation. Additionally, an analysis of energetic costs of each substation was made, based on one year's bill issued by the power supplier. It allowed us to scale new rectifying systems, adapted to the current reality consumption of the trolleybus system. Lastly, at a time each investment must be carefully analysed, an economic analysis of the required investments was made. Thus investment plans have been equated and three implementing measures were also discussed. The implementation of any of these measures will reduce the financial costs to the cost of the electricity needed to operate the two lines of trolleybuses. The time to get the investment back is from three to five years, which is a residual value compared to the lifetime of this type of equipment.

Keywords – Energy efficiency, sustainable mobility, trolleybus; rectifying systems

ÍNDICE GERAL

PREÂMBULO	0.1
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	1.1
1.1 – Cenário Energético Nacional	1.2
1.1.1 – Impacte do consumo de energia primária no Setor dos Transportes	1.4
1.1.2 – Legislação Aplicável no contexto da Eficiência Energética	1.8
1.2 – Os Troleicarros da Cidade de Coimbra	1.15
1.3 – Objetivos	1.19
1.4 – Estrutura de Dissertação	1.19
CAPÍTULO 2 – ESTADO DA ARTE	2.1
2.1 – Considerações Gerais	2.1
2.2 – Os Troleicarros Modernos	2.2
2.3 – A Realidade Atual na Utilização de Troleicarros	2.7
2.3.1 – Novas Linhas de Troleicarros na Europa	2.10
2.3.1.1 – Landskrona (Suécia) em 2003	2.10
2.3.1.2 – Kerch/Kertsch (Ucrânia) em 2004	2.11
2.3.1.3 – Roma (Itália) em 2005	2.12
2.3.1.4 – Castellón (Espanha) em 2008	2.12
2.3.1.5 – Lecce (Itália) em 2012	2.13
2.3.2 – Material Circulante	2.14
2.4 – Sistemas de Retificação e de Conversão AC-DC	2.15
2.4.1 – Retificadores/Conversores trifásicos AC-DC	2.18
2.4.2 – Topologias de Retificadores/Conversores trifásicos AC-DC	2.20
2.4.3 – Associação de Retificadores/Conversores AC-DC	2.22
2.4.4 – Poluição Harmónica	2.23
2.4.4.1 – Tipos de Distorção mais usuais em Sistemas de Retificação	2.25
2.4.5 – Fontes de Distorção Harmónica em Retificadores/Conversores AC-DC	2.26
2.4.6 – Efeitos da Distorção Harmónica	2.27
2.4.7 – Normas Nacionais e Internacionais	2.28
2.5 – Conclusões	2.29
CAPÍTULO 3 – DESCRIÇÃO E ENQUADRAMENTO DO PROBLEMA	3.1
3.1 – Introdução	3.1
3.2 – Localização dos Equipamentos (Subestações e Rede Aérea)	3.3
3.3 – Área de Influência de cada uma delas	3.3
3.3.1 – Rede de Tração alimentada pela Subestação de Montarroio	3.4
3.3.2 – Rede de Tração alimentada pela Subestação do Calhabé (S. José)	3.5
3.4 – Linhas em Serviço	3.7
3.4.1 – Linha nº 4	3.7
3.4.2 – Linha nº 103	3.9
3.5 – Subestação de Montarroio	3.11
3.5.1 – Utilização do Mercúrio na Atividade Humana	3.15
3.6 – Subestação do Calhabé	3.21

3.7 – Caraterização das Viaturas Troleicarro Existentes	3.24
3.8 – Conclusões	3.25
 CAPÍTULO 4 – ANÁLISE DE OPERAÇÃO DAS SUBESTAÇÕES RETIFICADORAS	 4.1
4.1 – Introdução	4.1
4.2 – Estudo Estatístico do Arranque em Viaturas Troleicarro	4.2
4.2.1 – Caracterização dos Horários das Linha nº 4 e Linha nº 103	4.2
4.2.2 – Simultaneidade de Arranque de Viaturas Troleicarro	4.3
4.2.3 – Modelização Estatística da Probabilidade do Arranque	4.5
4.2.3.1 – Parâmetro λ da Linha nº 4	4.7
4.2.3.2 – Parâmetro λ da Linha nº 103	4.7
4.2.4 – Probabilidade de Arranque em simultâneo em percurso de subida	4.8
4.2.5 – Monitorização em contexto real do arranque simultâneo	4.10
4.2.5.1– Metodologia da Medição	4.10
4.2.5.2– Medição da situação real	4.12
4.3 – Medições Efetuadas nas Subestações	4.16
4.3.1 – Características dos Equipamentos de Medição	4.17
4.3.2 – Metodologia	4.18
4.3.2.1 – Dimensionamento Teórico dos Ampops	4.21
4.3.2.2 – Dimensionamento Práticos do Ampops	4.21
4.3.3 – Medições	4.24
4.3.3.1 – Medições do Lado AC	4.24
4.3.3.2 – Medições do Lado DC	4.24
4.4 – Resultados Obtidos na Monitorização das Subestações	4.25
4.4.1 – Apresentação de Resultados da Monitorização da Subestação de Montarroio	4.26
4.4.1.1 – Potências Medidas (DC, Ativa, Aparente)	4.26
4.4.1.2 – Parâmetros de Eficiência	4.28
4.4.2– Apresentação de Resultados da Monitorização da Subestação do Calhabé	4.32
4.4.2.1 – Potências Medidas (DC, Ativa, Aparente)	4.32
4.4.2.2 – Parâmetros de Eficiência	4.34
4.4.3 – Análise dos Resultados da Monitorização	4.37
4.5– Fatura Energética das Subestações	4.40
4.5.1 – Caracterização dos Custos Variáveis relativos ao consumo de energia das Subestações	4.40
4.5.1.1 – Custo referente ao consumo de Energia Ativa	4.40
4.5.1.2 – Custo referente à Potência em Horas de Ponta	4.41
4.5.1.3 – Custo referente à Energia Reativa	4.42
4.5.2 – Caracterização dos Custos Fixos relativos ao consumo de energia das Subestações	4.42
4.6– Conclusões	4.43
 CAPÍTULO 5 – PROPOSTAS, CENÁRIOS DE MELHORIA E RESPETIVAS VIABILIDADES TECNÓ-ECONÓMICA	 5.1
5.1 – Introdução	5.1
5.2 – Dimensionamento dos Equipamentos	5.2
5.3 – Descrição do Estudo Efetuado	5.4
5.3.1 – Opção 1 – Substituição dos Sistemas de Retificação nas subestações de Montarroio e do Calhabé e ajuste na Potência Contratada	5.5
5.3.1.1– Custos e descrição dos equipamentos e trabalhos a efetuar na Opção 1	5.5
5.3.1.2– Poupança Energética e Financeira decorrente da implementação da Opção 1	5.6

5.3.1.3– Poupança Resultante do ajuste da Potência Contratada	5.8
5.3.2 – Opção 2 – Substituição do Sistema de Retificação na subestação de Montarroio	5.9
5.3.2.1– Custos e descrição dos equipamentos e trabalhos a efetuar na Opção 2	5.9
5.3.2.2– Poupança Energética e Financeira decorrente da implementação da Opção 1	5.9
5.3.2.3– Poupança Resultante do ajuste da Potência Contratada	5.11
5.4 – Parâmetros Financeiros	5.12
5.4.1 – Valor Atual e Valor Atual Líquido	5.12
5.4.2 – Taxas de Juro Nominal e Real	5.14
5.4.3 – Cash Flow	5.15
5.4.4 – Tempo de Retorno do Investimento	5.15
5.4.5 – Taxas Interna de Rentabilidade	5.15
5.5 – Análise Económica do Investimento	5.16
5.6 – Conclusão	5.24
 CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	 6.1
 6.1 – Conclusões	 6.1
6.2 – Trabalhos Futuros	6.3
 ANEXO 1– Horários e Percursos das Linhas nº 4 e Linha nº 103	 A.1
ANEXO 2 – Algoritmos de Cálculo do Equipamento de Monitorização Analisador da Chauvin Arnoux C.A.8334B	A.2

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

Figura 1.1 – Taxa de dependência energética (%)	1.2
Figura 1.2 – Energia Eólica em Portugal. Potência Eólica Instalada (MW) e a sua produção (GWh)	1.3
Figura 1.3 – Evolução do consumo de Energia Primária em Portugal	1.3
Figura 1.4 – Energia Elétrica a partir de FER em 2010	1.4
Figura 1.5 – Repartição da energia comercializada pela EDPSU, SA Ano de 2012	1.4
Figura 1.6 – Consumo de Energia Final por Setor Ano de 2010	1.5
Figura 1.7 – Evolução do Preço do barril de Brent de 2004 a 2011	1.5
Figura 1.8 – Evolução anual da emissão total de gases com efeito de estufa (potencial de aquecimento global) em Portugal	1.6
Figura 1.9 – Evolução anual da emissão de gases com efeito de estufa no setor dos transportes (potencial de aquecimento global) em Portugal	1.7
Figura 1.10 – Relação em % das evoluções anuais da emissão de gases com efeito de estufa potencial de aquecimento) em Portugal Setor dos Transportes vs Total	1.8
Figura 1.11 – Troleicarro Sécheron, com chassis e carroçaria Saurer	1.14
Figura 1.12 – Troleicarro a atravessar a Ponte Metálica sobre o Mondego	1.16
Figura 1.13 – Troleicarro British United Traction (BTU), com chassis Leyland	1.17
Figura 1.14 – Troleicarro Sunbeam/BTH	1.17
Figura 1.15 – Troleicarro Salvador Caetano/Efacec, junto ao Mercado D. Pedro V	1.18
Figura 1.16 – Troleicarro Trollino/Solaris, na <i>Linha nº 4</i>	1.18

CAPÍTULO 2 – ESTADO DA ARTE

Figura 2.1 – Esquema exemplificativo de uma rede de tração de troleicarros genérica com tração de motor de corrente contínua	2.2
Figura 2.2 – Pormenor de controlo por “reóstato”	2.4
Figura 2.3 – Pormenor de controlo por “conversor DC-DC”	2.5
Figura 2.4 – a) Pormenor de motor eléctrico de tração instalado num cubo de roda	2.6
Figura 2.4 – b) Imagem de um eixo motorizado de um troleicarro moderno	2.6
Figura 2.5 – Esquema de funcionamento dos diversos componentes electromecânicos de um troleicarro moderno de 18m da Irisbus Iveco, controlado por Inversor de Tensão	2.7
Figura 2.6 – Comparação de custos de exploração anual entre troleicarros articulados e viaturas articuladas a gasóleo	2.8
Figura 2.7 – Viatura modelo Solaris T18/ Solaris em serviço em Landskrona	2.11
Figura 2.8 – Viatura modelo Yumz T2 em serviço em Kerch/Kertsh	2.11
Figura 2.9 – Viatura modelo Solaris T18/Ganz em serviço na Linha nº 90	2.12
Figura 2.10 – Viatura modelo BredaMenarinibus em teste na Cidade de Roma	2.12
Figura 2.11 – Viatura modelo Cristalis/Civis em serviço	2.13
Figura 2.12 – Viatura VanHool/Vossloh-Kiepe	2.13
Figura 2.13 – Comparação de Preços entre 2000 e 2006 de troleicarros standards e articulados	2.15
Figura 2.14 – Retificador de meia-onda (com carga resistiva) e formas de onda	2.16
Figura 2.15 – Retificador de onda completa (com carga indutiva) e formas de onda	2.17
Figura 2.16 – Retificador trifásico em ponte completa (6 pulsos) com carga resistiva	2.20
Figura 2.17 – Ligação esquemática de um retificador de 6 pulsos	2.21
Figura 2.18 – Ligação esquemática de um retificador de 12 pulsos	2.21
Figura 2.19 – Ligação esquemática de um retificador de 24 pulsos	2.22

Figura 2.20 – a) Retificador/Conversor controlado de 12 pulsos em associação série	2.22
Figura 2.20 – b) Retificador/Conversor controlado de 12 pulsos em associação paralelo	2.22
Figura 2.212 – Espectro harmónico teórico da corrente absorvida por retificadores trifásicos de 6 e 12 pulsos	2.27

CAPÍTULO 3 – DESCRIÇÃO E ENQUADRAMENTO DO PROBLEMA

Figura 3.1 – Localização das Subestações de Retificação	3.3
Figura 3.2 – Rede de Tração alimentada pela subestação de Montarroio	3.4
Figura 3.3 – Rede de Tração alimentada pela subestação do Calhabé	3.6
Figura 3.4 - Rede de Tração Geral	3.6
Figura 3.5 – Trajeto da Linha nº 4	3.7
Figura 3.6 – Cota Altimétrica do percurso da Linha nº 4	3.8
Figura 3.7 – Trajeto da Linha nº 103	3.9
Figura 3.8 – Cota Altimétrica do percurso da Linha nº 103	3.10
Figura 3.9 – Entrada da subestação de Montarroio	3.11
Figura 3.10 – Quadro Blindado de média tensão (6kV-200A)	3.12
Figura 3.11 – Transformador 843 kVA de um dos grupos transformador-retificador	3.13
Figura 3.12 a) – Um dos grupo Retificadores	3.13
Figura 3.12 b) – Sistema de ventilação e ampolas de retificação em funcionamento	3.13
Figura 3.13 – Quadro de Distribuição de Corrente Contínua	3.14
Figura 3.14 – Interligação da alimentação entre a subestação de Montarroio e a rede de tração, junto ao Mercado D. Pedro V	3.15
Figura 3.15 – Subestação do Calhabé	3.21
Figura 3.16 – Celas de Média Tensão	3.22
Figura 3.17 – Transformador do Grupo Retificador	3.22
Figura 3.18 – Interior do retificador da subestação do Calhabé constituído por 5 diodos por ramo	3.23
Figura 3.19 – Retificador, Bobina de Alisamento e Quadro Geral de Corrente Contínua	3.23
Figura 3.20 – Curvas características do motor de tração ML3550/K4 da Skoda	3.25

CAPÍTULO 4 – ANÁLISE DE OPERAÇÃO DAS SUBESTAÇÕES RETIFICADORAS

Figura 4.1 – Troleicarro Efacec/Salvador Caetano a efetuar a Linha nº 103 com o horário referente à chapa 1	4.3
Figura 4.2 – Sistema de gestão de frota com ligação GPS, existente a bordo das viaturas dos SMTUC à chegada à paragem Universidade com horário programado e real, percorrido em 15 minutos	4.4
Figura 4.3 – Representação gráfica da probabilidade ocorrência de eventos simultâneos	4.9
Figura 4.4 – a) Smartphone HTC One	4.10
Figura 4.4 – b) Smartphone Samsung Google Nexus	4.10
Figura 4.5 – Representação gráfica da evolução da velocidade instantânea da viatura troleicarro em operação na Linha nº 103, com chapa 9 no respetivo trajeto e os seus arranques	4.12
Figura 4.6 – Representação gráfica da evolução da velocidade instantânea da viatura troleicarro em operação na Linha nº 4, com chapa 34 no respetivo trajeto e os seus arranques	4.12
Figura 4.7 – Representação gráfica da evolução da velocidade instantânea da viatura troleicarro em operação na Linha nº 103, com chapa 1 no respetivo trajeto e os seus arranques	4.13
Figura 4.8 – Representação gráfica da evolução da velocidade instantânea da viatura troleicarro em operação na Linha nº4, com chapa 18 no respetivo trajeto e os seus arranques	4.13
Figura 4.9 – Comparação entre as probabilidades de ocorrência de eventos simultâneos (em %) evidenciados do Estudo Estatístico versos Resultado da Monitorização efetuada	4.15
Figura 4.10 – Equipamento Analisador de Chauvin Arnoux CA8334B	4.17

Figura 4.11 – Pinça de medição de correntes AC – referência MN93A	4.18
Figura 4.12 – a) Pinça de medição utilizada para medição de corrente AC ou DC	4.19
Figura 4.12 – b) Relação de medição de 1A / 1mV até um máximo de 2 000A	4.19
Figura 4.13 – Amplificador somador não inversor de duas entradas	4.19
Figura 4.14 – Exemplificação esquemática da ligação dos equipamentos	4.23
Figura 4.15 – a) Medição do Lado AC, na subestação de Montarroio	4.24
Figura 4.15 – b) Medição do Lado AC, na subestação do Calhabé	4.24
Figura 4.16 – a) Medição do Lado DC, na subestação de Montarroio	4.25
Figura 4.16 – b) Medição do Lado DC, na subestação de Calhabé	4.25
Figura 4.17 – Valores medidos no dia 03/05/2012 – quinta-feira	4.26
Figura 4.18 – Valores medidos no dia 04/05/2012 – sexta -feira	4.26
Figura 4.19 – Valores medidos no dia 07/05/2012 – segunda -feira	4.27
Figura 4.20 – Valores medidos no dia 08/05/2012 – terça-feira	4.27
Figura 4.21 – Valores medidos no dia 09/05/2012 – quarta-feira	4.27
Figura 4.22 – Valores medidos no dia 10/05/2012 – quinta-feira	4.28
Figura 4.23 – Evolução do THD_i (em %) durante o dia de segunda -feira 07/05/2012	4.29
Figura 4.24 –Espetro harmónico às 10h45m de segunda-feira 07/05/2012, em comparação com o espectro harmónico teórico de um retificador de 12 pulsos	4.30
Figura 4.25 – Evolução do THD_v (em %) durante o dia de segunda -feira 07/05/2012	4.31
Figura 4.26 – Evolução durante o dia de segunda-feira 07/05/2012 do Rendimento (η) e Fator de Potência	4.32
Figura 4.27 – Valores medidos no dia 03/05/2012 – quinta-feira	4.32
Figura 4.28 – Valores medidos no dia 04/05/2012 – sexta -feira	4.32
Figura 4.29 – Valores medidos no dia 07/05/2012 – segunda-feira	4.32
Figura 4.30 – Valores medidos no dia 08/05/2012 – terça-feira	4.32
Figura 4.31 – Valores medidos no dia 09/05/2012 – quarta-feira	4.34
Figura 4.32 – Valores medidos no dia 10/05/2012 – quinta-feira	4.34
Figura 4.33 – Evolução do THD_i (em %) durante o dia de quinta-feira 10/05/2012	4.35
Figura 4.34 –Espetro harmónico às 10h45m de quinta-feira 10/05/2012, em comparação com o espectro harmónico teórico de um retificador de 6 pulsos	4.35
Figura 4.35 – Evolução em do THD_v (em %) durante o dia de quinta-feira 10/05/2012	4.36
Figura 4.36 – Evolução durante o dia de quinta-feira 10/05/2012 do Rendimento (η) e Fator de Potência	4.37
Figura 4.37 – Custo com energia elétrica por subestação (€)	4.39
Figura 4.38 – Consumo de energia ativa por subestação (kWh)	4.30
Figura 4.39 – Consumo de energia ativa no ciclo tetra-horário (kWh), por subestação	4.40
Figura 4.40 – Custo de energia ativa no ciclo tetra-horário, por subestação (€)	4.41
Figura 4.41 – Evolução mensal do custo da potência em Horas de ponta, por subestação (€)	4.42
Figura 4.42 – Evolução mensal do custo da energia reativa na subestação de Montarroio (€)	4.42
 ANEXO 1– Horários e Percursos das Linhas nº 4 e Linha nº 103	 A1.1
Figura A1.1 – Percurso da Linha nº 4	A1.2
Figura A1.2 – Horário da Linha nº 4	A1.2
Figura A1.3 – Percurso da Linha nº 103	A1.3
Figura A1.4 – Horário da Linha nº 103	A1.3

ÍNDICE DE TABELAS

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	1.1
Tabela 1.1 – Tabela EU para a emissão de motores de autocarro a diesel	1.7
Tabela 1.2 – Resumo dos impactos do PNAEE 2016 por Áreas	1.11
CAPÍTULO 2 – ESTADO DA ARTE	
Tabela 2.1 – Custos por viatura considerados para efeito do estudo levado a cabo na Cidade de Salzburgo – Preços de 2003	2.17
Tabela 2.2 – Ciclos de Sobrecarga standard de acordo com a EN 50328 e IEC 60146 -1-1	2.18
CAPÍTULO 3 – DESCRIÇÃO E ENQUADRAMENTO DO PROBLEMA	
Tabela 3.1 – Inclinações de diversos trechos do percurso da Linha nº 4	3.9
Tabela 3.2 – Inclinações de diversos trechos do percurso da Linha nº 103	3.10
Tabela 3.3 – Mecanismos de absorção, eliminação e efeitos na saúde das diferentes espécies mercuriais	3.18
Tabela 3.4 – Níveis de referência de concentrações de metilmercúrio	3.19
Tabela 3.5 – Níveis mínimos de referência à ingestão por via oral de Cloreto Mercúrico e Vapor de Mercúrio	3.19
Tabela 3.6 – Relação entre a forma química, propriedades, características e aplicações do mercúrio	3.20
CAPÍTULO 4 – ANÁLISE DE OPERAÇÃO DAS SUBESTAÇÕES RETIFICADORAS	
Tabela 4.1 – Valores de V_0 e V_b teóricos para AMPOP da subestação de Montarroio ($V^{cte}=0.5V$)	4.21
Tabela 4.2 – Valores de V_0 e V_b teóricos para o AMPOP da subestação do Calhabé ($V^{cte}=0.5V$)	4.21
Tabela 4.3 – Valores de V_0 e V_b reais referentes ao AMPOP da subestação do Montarroio ($V^{cte}=0.5V$)	4.22
Tabela 4.4 – Valores de V_0 e V_b reais referentes ao AMPOP da subestação do Calhabé ($V^{cte}=0.5V$)	4.23
Tabela 4.5 – Custos anuais com potência contratada e termo fixo, por subestação	4.43
CAPÍTULO 5 – PROPOSTAS, CENÁRIOS DE MELHORIA E VIABILIDADE TECNOLÓGICA E ECONÓMICA	
Tabela 5.1 – Tempo de funcionamento em simultâneo num horário h referente à subestação de Montarroio	5.3
Tabela 5.2 – Investimento Opção 1 – Custos e descrição dos trabalhos a efetuar	5.6
Tabela 5.3 – Consumos energéticos anuais verificados antes da implementação da Opção 1	5.6
Tabela 5.4 – Consumos energéticos anuais estimados após a implementação da Opção 1	5.7
Tabela 5.5 – Poupança anual estimada pela implementação da Opção 1	5.8
Tabela 5.6 – Poupança financeira estimada e discriminada resultante da implementação da Opção 1	5.8
Tabela 5.7 – Poupança anual estimada resultante do ajuste da potência contratada	5.8
Tabela 5.8 – Investimento Opção 2 – Custos e descrição dos trabalhos a efetuar	5.9
Tabela 5.9 – Consumos energéticos anuais verificados antes da implementação da Opção 2	5.10
Tabela 5.10 – Consumos energéticos anuais estimados após a implementação da Opção 2	5.10
Tabela 5.11 – Poupança anual estimada pela implementação da Opção 1	5.10
Tabela 5.12 – Poupança financeira estimada e discriminada resultante da implementação da Opção 2	5.11
Tabela 5.13 – Resumo da poupança em cada uma das opções apresentadas	5.11
Tabela 5.14 – Determinação do CashFlow (CF) para o Cenário de Aumento de Energia de 0%	5.18

Tabela 5.15 – Determinação do CashFlow (CF) atualizado para taxas de atualização (TA) de 0%, 2% e 4%	5.18
Tabela 5.16 – Mapa de Investimentos e de CashFlow (CF) atualizado para cada ano correspondente e respetivo TIR e VAL	5.18
Tabela 5.17 – Determinação do CashFlow (CF) para o Cenário de Aumento de Energia de 2%	5.19
Tabela 5.18 – Determinação do CashFlow (CF) atualizado para taxas de atualização (TA) de 0%, 2% e 4%	5.19
Tabela 5.19 – Mapa de Investimentos e de CashFlow (CF) atualizado para cada ano correspondente e respetivo TIR e VAL	5.19
Tabela 5.20 – Determinação do CashFlow (CF) para o Cenário de Aumento de Energia de 4%	5.20
Tabela 5.21 – Determinação do CashFlow (CF) atualizado para taxas de atualização (TA) de 0%, 2% e 4%	5.20
Tabela 5.22 – Mapa de Investimentos e de CashFlow (CF) atualizado para cada ano correspondente e respetivo TIR e VAL	5.20
Tabela 5.23 – Determinação do CashFlow (CF) para o Cenário de Aumento de Energia de 0%	5.21
Tabela 5.24 – Determinação do CashFlow (CF) atualizado para taxas de atualização (TA) de 0%, 2% e 4%	5.21
Tabela 5.25 – Mapa de Investimentos e de CashFlow (CF) atualizado para cada ano correspondente e respetivo TIR e VAL	5.21
Tabela 5.26 – Determinação do CashFlow (CF) para o Cenário de Aumento de Energia de 2%	5.22
Tabela 5.27 – Determinação do CashFlow (CF) atualizado para taxas de atualização (TA) de 0%, 2% e 4%	5.22
Tabela 5.28 – Mapa de Investimentos e de CashFlow (CF) atualizado para cada ano correspondente e respetivo TIR e VAL	5.22
Tabela 5.29 – Determinação do CashFlow (CF) para o Cenário de Aumento de Energia de 4%	5.23
Tabela 5.30 – Determinação do CashFlow (CF) atualizado para taxas de atualização (TA) de 0%, 2% e 4%	5.23
Tabela 5.31 – Mapa de Investimentos e de CashFlow (CF) atualizado para cada ano correspondente e respetivo TIR e VAL	5.23
Tabela 5.32 – Resumo dos VAL e TIR da Opção 1, para os diversos cenários apresentados	5.24
Tabela 5.33 – Resumo dos VAL e TIR da Opção 2, para os diversos cenários apresentados	5.24

PREÂMBULO

A mobilidade elétrica sempre foi um tema que me fascinou. Ainda hoje recordo com saudade da primeira viagem que fiz, acompanhado pelo meu avô no final dos anos 70 do século passado, nos saudosos elétricos que outrora existiam na Cidade de Coimbra. Lembro-me como insistentemente lhe pedi, como se de uma ordem se tratasse, para que fosse comigo dar “uma voltita” no “*uu badau badau*”, como eu lhe chamava. Recordo ainda a primeira viagem de comboio que fiz, em meados dos anos 80 do século passado, na companhia do meu pai, entre Coimbra e Porto-São Bento a bordo de uma UTE (Unidade Tripla Elétrica) da CP que naquele tempo fazia o serviço regional entre estas duas cidades.

Recordo também, quando vinha habitualmente com os meus pais a Coimbra, com oito, nove anos, sobretudo ao sábado de manhã ao Mercado Municipal, avistar uns autocarros engraçados que não faziam barulho e tinham duas hastes “*Chamam-se tróleys*”, dizia o meu pai, “*e são o futuro dos transportes, pois são mais eficientes e não são poluentes*”.

Mais, tarde, no início dos anos 90, já a frequentar o ensino Secundário na Escola Avelar Brotero, recordo também ainda as viagens a bordo dos troleicarros, quer a ida para o liceu quer a vinda para casa. Intuitivamente, dava por mim a preferir, sempre que era possível, a mobilidade elétrica. Talvez pelo “bichinho” da eletrotecnia, que desde cedo me acompanhou, pois desde do ensino primário que, sempre que me perguntavam o que queria ser quando fosse “grande”, eu respondia “engenheiro eletrotécnico”.

Ainda hoje, essa preferência se mantém. Dou por mim, sempre que posso, a preferir a mobilidade elétrica, até mesmo nas deslocações dentro da cidade, a bordo das viaturas dos Serviços Municipalizados de Transportes Urbanos de Coimbra.

Fui deste modo crescendo com a ideia de que o futuro da mobilidade elétrica estava aqui, na Cidade de Coimbra, e até, de fato fazia sentido, a Cidade do Conhecimento e da sua Universidade, uma das mais antigas em funcionamento na Europa e no mundo, e a mais antiga de Portugal. Portanto, Coimbra tinha e têm ao seu dispor um meio de transporte eficiente, os troleicarros. Essa perceção foi-se acentuando tanto mais quando visitava a Cidade do Porto e via viaturas iguais às da Cidade de Coimbra em circulação, mudando apenas as suas cores.

Hoje devo reconhecer que fomos visionários, quando em 1947, sem querer, talvez ou não, a Cidade decidiu continuar a privilegiar a mobilidade elétrica, que vinha desde o início do Século XX, com os “carros elétricos”, mas abrindo os horizontes, adaptando esta mobilidade à realidade de então, apostando fortemente nos troleicarros. Poder-se-á dizer que o fomos, porque ao continuarmos com a aposta nesta mobilidade, apostámos que esta seria a mobilidade do futuro e de fato o futuro deu-nos razão.

Hoje, mais do que nunca este é o tema na ordem do dia.

No momento em que diversas empresas construtoras de autocarros, a nível mundial investem fortemente na mobilidade elétrica, em várias frentes, tais como em autocarros com baterias, os troleicarros não foram esquecidos, nem são uma visão do passado, antes pelo contrário, têm com eles uma grande vantagem pois a sua autonomia não se esgota ao fim de uma centena de quilómetros, ou de algumas horas de serviço. Por outro lado, os tróleis podem aliar esta vantagem com a incorporação de baterias, circulando deste modo em zonas ou partes de trajetos onde por qualquer razão (arquitetónica, técnica etc.) não é possível utilizar-se uma rede de tração

Para além disto, não devemos esquecer o seu contributo ambiental em 66 anos de serviço. Durante este tempo foram evitadas a emissão de dezenas de toneladas de partículas poluentes, sendo o seu benefício financeiro certamente de alguns milhões de Euros. Por outro lado e talvez o aspeto mais importante, seja o da saúde da população conimbricense, que certamente é mais saudável, disso não tenhamos dúvidas.

Mas será que Coimbra está só nesta sua opção visionária?

Claro que não, hoje estão em funcionamento linhas de troleicarros em 312 cidades. Só na Europa, existem linhas de troleicarros em 152 cidades, muitas delas com mais de 20 linhas em serviço.

Ao longo de todos estes anos em funcionamento, o Sistema de Troleicarros da Cidade de Coimbra foi sendo melhorado, em particular na remodelação e aquisição de novas viaturas, melhorando sobretudo o seu conforto, pelo menos até 1985, onde em Dezembro foi entregue a última unidade, num total de 20, construídos pelo consórcio *Salvador Caetano-Efacec*. Depois dessa entrega, só em 2009 a Cidade de Coimbra veria uma nova unidade de troleicarro a circular, o “trollino”, da *Skoda Solaris*, este com uma substancial melhoria na eficiência energética e com a possibilidade de ser dotado com travagem regenerativa para a rede de tração, mas convenhamos que com um custo quase proibitivo.

Mas então e agora? Para onde vamos?

Deixaremos morrer lentamente um *ex libris* da Cidade, e com ele a visão pioneira e a ousadia de outrora, onde se previu, e a meu ver bem, que o futuro estaria na mobilidade elétrica?

Onde podemos melhorar a eficiência energética do sistema? Nas viaturas, nos equipamentos de retificação?

É este o paradigma que se nos apresenta. Numa altura em que todos vivemos com constrangimentos financeiros e que cada investimento deve ser criteriosamente analisado parece-me que o caminho mais inteligente será apostar na melhoria da eficiência das subestações de retificação. Será aqui que se encontram alternativas para uma imediata diminuição no consumo de energia.

Apostando em subestações mais eficientes, que nos levarão de imediato a um menor custo por km percorridos, chegaremos com certeza à conclusão de que estamos no caminho certo e em termos de custos de exploração, estes situar-se-ão bem abaixo dos custos da mobilidade a gásóleo e com retornos de investimentos mais rápidos.

Será o compromisso entre o investimento que se poderá ou quererá fazer e o seu retorno versus o que se pretende obter da rede de troleicarros que nos ditará qual a opção que se fará neste futuro próximo.

Deixar morrer este conceito de mobilidade elétrica típico da Cidade Coimbra será retroceder mais de meio século nos sistemas de transporte, apagando uma valiosa herança histórica, talvez indo por um caminho à partida mais fácil, com a substituição dos troleicarros por viaturas a gásóleo, mas com o consequente aumento da nossa dependência dos combustíveis fósseis, que não temos e talvez nunca venhamos a ter, deixando em contrapartida um pesado legado no futuro dos nossos filhos e netos, como o do aumento da emissão de poluentes, um pior ambiente e uma pior saúde pública.

Será com certeza uma ideia em contraciclo com tudo o que se tem visto nos tempos modernos.

Este trabalho, traduz assim o meu agradecimento á viaturas troleicarro e aos seus visionários pelo seu contributo à Cidade e pelo fascínio que esta questão desde cedo despertou em mim.

PREÂMBULO

A mobilidade elétrica sempre foi um tema que me fascinou. Ainda hoje recordo com saudade da primeira viagem que fiz, acompanhado pelo meu avô no final dos anos 70 do século passado, nos saudosos elétricos que outrora existiam na Cidade de Coimbra. Lembro-me como insistentemente lhe pedi, como se de uma ordem se tratasse, para que fosse comigo dar “uma voltita” no “*uu badau badau*”, como eu lhe chamava. Recordo ainda a primeira viagem de comboio que fiz, em meados dos anos 80 do século passado, na companhia do meu pai, entre Coimbra e Porto-São Bento a bordo de uma UTE (Unidade Tripla Elétrica) da CP que naquele tempo fazia o serviço regional entre estas duas cidades.

Recordo também, quando vinha habitualmente com os meus pais a Coimbra, com oito, nove anos, sobretudo ao sábado de manhã ao Mercado Municipal, avistar uns autocarros engraçados que não faziam barulho e tinham duas hastes “*Chamam-se tróleis*”, dizia o meu pai, “*e são o futuro dos transportes, pois são mais eficientes e não são poluentes*”.

Mais, tarde, no início dos anos 90, já a frequentar o ensino Secundário na Escola Avelar Brotero, recordo também ainda as viagens a bordo dos troleicarros, quer a ida para o liceu quer a vinda para casa. Intuitivamente, dava por mim a preferir, sempre que era possível, a mobilidade elétrica. Talvez pelo “bichinho” da eletrotecnia, que desde cedo me acompanhou, pois desde do ensino primário que, sempre que me perguntavam o que queria ser quando fosse “grande”, eu respondia “engenheiro eletrotécnico”.

Ainda hoje, essa preferência se mantém. Dou por mim, sempre que posso, a preferir a mobilidade elétrica, até mesmo nas deslocações dentro da cidade, a bordo das viaturas dos Serviços Municipalizados de Transportes Urbanos de Coimbra.

Fui deste modo crescendo com a ideia de que o futuro da mobilidade elétrica estava aqui, na Cidade de Coimbra, e até, de fato fazia sentido, a Cidade do Conhecimento e da sua Universidade, uma das mais antigas em funcionamento na Europa e no mundo, e a mais antiga de Portugal. Portanto, Coimbra tinha e têm ao seu dispor um meio de transporte eficiente, os troleicarros. Essa perceção foi-se acentuando tanto mais quando visitava a Cidade do Porto e via viaturas iguais às da Cidade de Coimbra em circulação, mudando apenas as suas cores.

Hoje devo reconhecer que fomos visionários, quando em 1947, sem querer, talvez ou não, a Cidade decidiu continuar a privilegiar a mobilidade elétrica, que vinha desde o início do Século XX, com os “carros elétricos”, mas abrindo os horizontes, adaptando esta mobilidade à realidade de então, apostando fortemente nos troleicarros. Poder-se-á dizer que o fomos, porque ao continuarmos com a aposta nesta mobilidade, apostámos que esta seria a mobilidade do futuro e de fato o futuro deu-nos razão.

Hoje, mais do que nunca este é o tema na ordem do dia.

No momento em que diversas empresas construtoras de autocarros, a nível mundial investem fortemente na mobilidade elétrica, em várias frentes, tais como em autocarros com baterias, os troleicarros não foram esquecidos, nem são uma visão do passado, antes pelo contrário, têm com eles uma grande vantagem pois a sua autonomia não se esgota ao fim de uma centena de quilómetros, ou de algumas horas de serviço. Por outro lado, os tróleis podem aliar esta vantagem com a incorporação de baterias, circulando deste modo em zonas ou partes de trajetos onde por qualquer razão (arquitetónica, técnica etc.) não é possível utilizar-se uma rede de tração

Para além disto, não devemos esquecer o seu contributo ambiental em 66 anos de serviço. Durante este tempo foram evitadas a emissão de dezenas de toneladas de partículas poluentes, sendo o seu benefício financeiro certamente de alguns milhões de Euros. Por outro lado e talvez o aspeto mais importante, seja o da saúde da população conimbricense, que certamente é mais saudável, disso não tenhamos dúvidas.

Mas será que Coimbra está só nesta sua opção visionária?

Claro que não, hoje estão em funcionamento linhas de troleicarros em 312 cidades. Só na Europa, existem linhas de troleicarros em 152 cidades, muitas delas com mais de 20 linhas em serviço.

Ao longo de todos estes anos em funcionamento, o Sistema de Troleicarros da Cidade de Coimbra foi sendo melhorado, em particular na remodelação e aquisição de novas viaturas, melhorando sobretudo o seu conforto, pelo menos até 1985, onde em Dezembro foi entregue a última unidade, num total de 20, construídos pelo consórcio *Salvador Caetano-Efacec*. Depois dessa entrega, só em 2009 a Cidade de Coimbra veria uma nova unidade de troleicarro a circular, o “trollino”, da *Skoda Solaris*, este com uma substancial melhoria na eficiência energética e com a possibilidade de ser dotado com travagem regenerativa para a rede de tração, mas convenhamos que com um custo quase proibitivo.

Mas então e agora? Para onde vamos?

Deixaremos morrer lentamente um *ex libris* da Cidade, e com ele a visão pioneira e a ousadia de outrora, onde se previu, e a meu ver bem, que o futuro estaria na mobilidade elétrica?

Onde podemos melhorar a eficiência energética do sistema? Nas viaturas, nos equipamentos de retificação?

É este o paradigma que se nos apresenta. Numa altura em que todos vivemos com constrangimentos financeiros e que cada investimento deve ser criteriosamente analisado parece-me que o caminho mais inteligente será apostar na melhoria da eficiência das subestações de retificação. Será aqui que se encontram alternativas para uma imediata diminuição no consumo de energia.

Apostando em subestações mais eficientes, que nos levarão de imediato a um menor custo por km percorridos, chegaremos com certeza à conclusão de que estamos no caminho certo e em termos de custos de exploração, estes situar-se-ão bem abaixo dos custos da mobilidade a gásóleo e com retornos de investimentos mais rápidos.

Será o compromisso entre o investimento que se poderá ou quererá fazer e o seu retorno versus o que se pretende obter da rede de troleicarros que nos ditará qual a opção que se fará neste futuro próximo.

Deixar morrer este conceito de mobilidade elétrica típico da Cidade Coimbra será retroceder mais de meio século nos sistemas de transporte, apagando uma valiosa herança histórica, talvez indo por um caminho à partida mais fácil, com a substituição dos troleicarros por viaturas a gásóleo, mas com o consequente aumento da nossa dependência dos combustíveis fósseis, que não temos e talvez nunca venhamos a ter, deixando em contrapartida um pesado legado no futuro dos nossos filhos e netos, como o do aumento da emissão de poluentes, um pior ambiente e uma pior saúde pública.

Será com certeza uma ideia em contraciclo com tudo o que se tem visto nos tempos modernos.

Este trabalho, traduz assim o meu agradecimento á viaturas troleicarro e aos seus visionários pelo seu contributo à Cidade e pelo fascínio que esta questão desde cedo despertou em mim.

1.INTRODUÇÃO

A Mobilidade Elétrica (ME) é um dos grandes temas que atualmente se encontram em discussão nos sistemas de transporte de passageiros, tanto mais quando se fala na necessidade destes fomentarem a sua própria sustentabilidade energética.

A necessidade de medidas de racionalização de energia, de melhoria da eficiência energética e do incremento de produção em fontes de energia renovável (FER), dando cumprimento à legislação comunitária e a sua obrigatoriedade de transposição para legislação nacional, obriga Portugal a delinear periodicamente Planos Nacionais de Ação para a Eficiência Energética (PNAEE) e Planos Nacionais de Ação para as Energias Renováveis (PNAER). Estes Planos traçam metas, objetivos quantificáveis e mensuráveis na redução efetiva da energia elétrica e do incremento de energia renovável no *mix* energético nacional, com o objetivo final de diminuir a dependência energética e em particular dos combustíveis fósseis. Aplicar estas medidas no setor dos transportes, traduzir-se-á num importante desafio, para o cumprimento nacional das metas estabelecidas e assumidas por Portugal

Neste contexto, a diminuição do consumo de combustíveis fósseis leva também a uma consequente diminuição dos Gases de Efeito de Estufa (GEE), que é crucial para um melhor ambiente e uma melhor saúde pública quer desta geração quer das gerações futuras. Atualmente o setor dos transportes é responsável por 36,7% do consumo de energia primária, ou seja de combustíveis fósseis, com impacto direto na emissão dos GEE.

Aliado a isto, importa ainda salientar a questão histórica, que liga a mobilidade elétrica (ME) à cidade de Coimbra, as quais se encontram intrinsecamente ligadas há mais de cem anos.

A ME faz parte desta cidade, sendo por isso indissociável desta sendo considerado por muitos um *ex-libris* turístico e um cartão-de-visita. A ME nasceu em Coimbra, com a implementação dos “carros elétricos”, mais concretamente em janeiro de 1911, onde foi iniciado o serviço de Transportes Coletivos de tração elétrica, por substituição dos típicos carros americanos, puxados por animais, dominando até meados dos anos 70 do século passado como a forma mais significativa de mobilidade dos transportes públicos da cidade.

A aposta da cidade na Rede de Troleicarros deu-se em 1947 e recorde-se que é a única ainda em serviço no país, a mais antiga da Península Ibérica e uma das mais antigas da Europa e do Mundo, apesar de neste momento ser constituída por uma frota envelhecida e equipada com equipamentos energeticamente ineficientes, nomeadamente as suas subestações de retificação.

É neste âmbito que esta dissertação se desenvolve. A necessidade e a obrigatoriedade de se implementarem medidas de eficiência energética, nomeadamente no setor dos transportes objeto desta dissertação, levam-nos obviamente a iniciar por aqui o estudo da implementação dessas mesmas medidas, convergindo deste modo para os planos de eficiência energética nacional e consequentemente comunitária.

Não obstante, acresce ainda salientar a necessidade urgente da substituição da subestação de Montarroio, que se encontra inserida junto de uma escola secundária. A tecnologia de retificação, associada a esta subestação, é um perigo eminente, quer para o ambiente, quer para a saúde pública, uma vez que é baseada na utilização de mercúrio, que como se sabe é um poluente com efeitos nocivos na saúde pública.

1.1. Cenário Energético Nacional

O cenário energético nacional é caracterizado pela escassez ou até mesmo inexistência de recursos endógenos referentes às energias primárias de origem fóssil. Estes recursos são aqueles que na generalidade asseguram as necessidades energéticas dos países desenvolvidos, e utilizados como fontes de energia na produção de eletricidade.

De acordo com os dados disponibilizados pela Direção Geral de Geologia e Energia (DGGE) e cujos valores podem se conferidos na figura (1.1), a taxa de dependência energética de Portugal revela uma forte dependência do exterior no que concerne às fontes primárias de origem fóssil como são o petróleo, o gás natural e o carvão. [1]

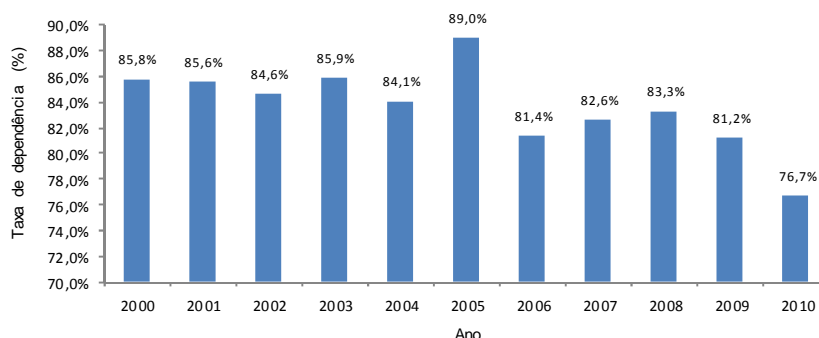


Figura 1.1 – Taxa de dependência energética (%.) - Fonte: DGGE - (tratado pelo autor)

Contudo, nos últimos cinco anos verifica-se que esta taxa de dependência tem apresentado uma tendência decrescente, excetuando os anos de 2007 e 2008 onde terá tido um ligeiro aumento. Este aumento é sustentado pelo fato de estes dois anos terem sido anos excessivamente secos, em particular o ano de 2008, o que terá contribuído em muito para um aumento do consumo de combustíveis de origem fóssil usados, em particular na produção de eletricidade.

Este decréscimo contrasta com o aumento das potências instaladas de energia renováveis. Neste aspeto, toma especial relevância a produção de energia eólica e consequentemente do aumento de produção de energia por esta via, cuja evolução entre o ano 2000 e 2010 são indicadas na figura (1.2). Este aumento da produção de energia eólica atingiu um crescimento médio de 47% ao ano. [1]

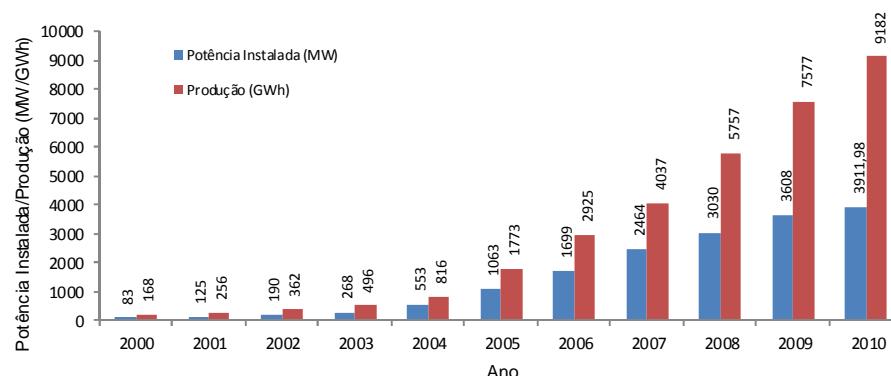


Figura 1.2 – Energia Eólica em Portugal. Potência Eólica Instalada (MW) e a sua produção (GWh)
Fonte: DGGE - (tratado pelo autor)

Da análise da evolução do consumo de energia primária em Portugal disponibilizada pela (DGEG) e indicada na figura (1.3) constata-se que o petróleo mantém ainda um papel essencial no conjunto de todas as energias consumidas, tendo representado no ano de 2010, cerca de 49,1% do total consumido.

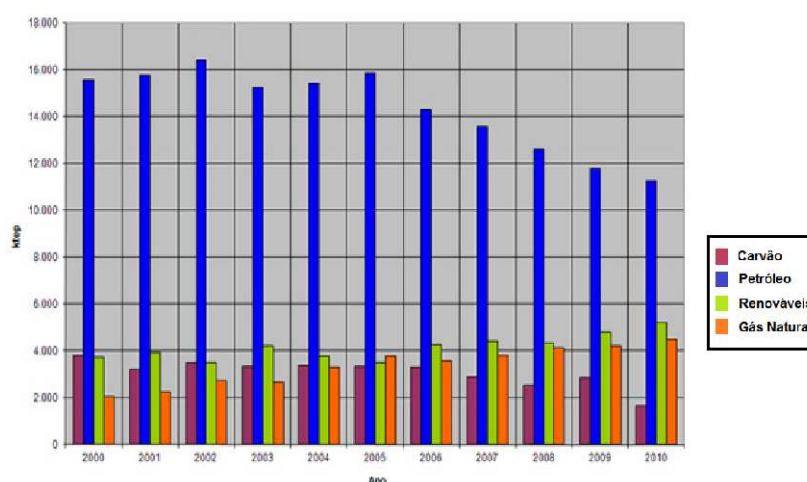


Figura 1.3 – Evolução do consumo de Energia Primária em Portugal (ktep) - Fonte: DGGE

Nesse mesmo ano, o contributo das energias renováveis, no consumo total de energia primária foi de 22,8%, contra os 20% do ano anterior, confirmando um importante incremento no contributo destas energias na produção de energia primária. Esta tendência mantém-se desde do ano de 2008 e contrasta com a evolução em sentido inverso no consumo de carvão.

Estes dados são confirmados com a conversão de algumas centrais térmicas a carvão em centrais de ciclo combinado a gás natural, com impacto direto na diminuição das emissões de CO₂. Paralelamente este ponto é também sustentado pelo aumento progressivo no consumo de

gás natural, conforme se pode verificar na figura (1.3), que representa no ano de 2010 uma percentagem de 19,7% do consumo de todas as energias, contra 17,5% evidenciado no ano anterior. [1]

De acordo ainda com a DGEG, a energia elétrica produzida a partir de fontes de energia renováveis (FER) no ano de 2010, conforme se pode verificar na figura 1.4 é caracterizada maioritariamente de origem hídrica, com 55,6%, logo seguida da eólica com 31,1%, ficando o restante para a produção por biomassa com 11,6%, fotovoltaica e térmica com 0,7%.

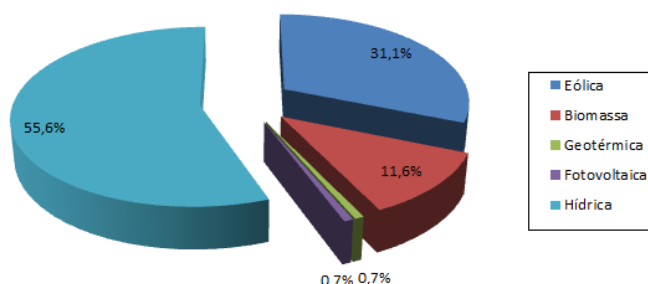


Figura 1.4 – Energia elétrica a partir de FER em 2010 - Fonte: DGGE – (tratado pelo autor)

Uma questão relevante é neste momento o *mix* de energia comercializada pela EDPSU, SA no ano de 2011, que representava nesse ano o comercializador com mais peso no mercado de energia.

O rótulo da energia elétrica comercializada por esta entidade nesse ano, indica-nos que as energias renováveis na repartição da energia comercializada ascenderam a 56% da energia total comercializada, conforme podemos verificar na figura (1.5). [2]

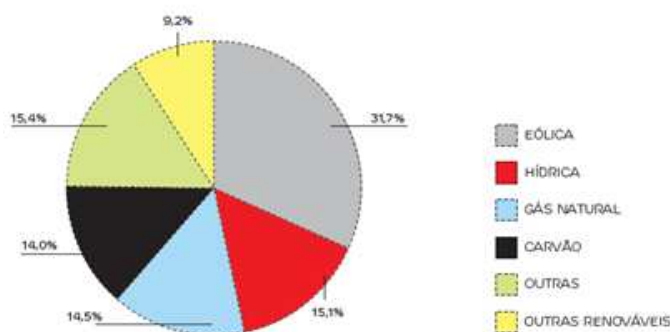


Figura 1.5 – Repartição da energia comercializada pela EDPSU, SA Ano 2011 - Fonte: EDPSU

Importa salientar que este esforço, na aposta nas energias renováveis, é assinalável e de reconhecido mérito, quer nacional quer internacionalmente.

1.1.1. Impacto do consumo de energia primária no Setor dos Transportes

No que concerne ao consumo da energia primária por setor de atividade e de acordo com a DGEG, os setores dos Transportes e da Indústria, são os setores com maior incidência, com uma “fatia” de 36,7% e 29,6%, respetivamente. [1]

Na figura (1.6) está indicado o contributo no consumo final de cada um dos setores de atividade em Portugal.

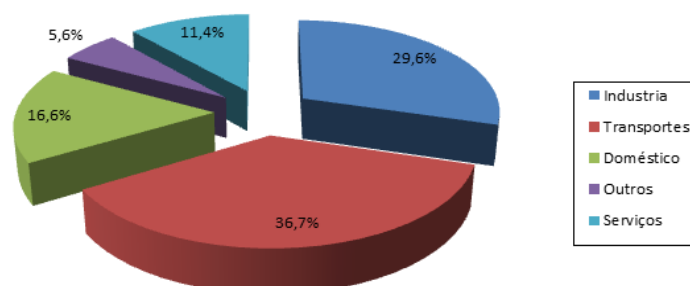


Figura 1.6 – Consumo de Energia Final por Setor no ano de 2010- Fonte: DGGE – (tratado pelo autor)

Pode-se verificar, que face ao “peso” que o consumo de energia final tem no setor de transportes, quanto maior for a dependência ao nível dos combustíveis fósseis no consumo da energia no setor dos transportes, maior será também a dependência relativa a estes combustíveis, em particular no consumo do petróleo e seus derivados tais como o gasóleo rodoviário e a gasolina.

O consumo destes combustíveis neste setor, refletem-se obviamente no transporte rodoviário, quer de mercadorias quer de passageiros. Se no caso do transporte rodoviário de mercadorias e passageiros interurbanos esta dependência é de 100%, pois a fonte de energia é o gasóleo, no caso dos transportes de passageiros dentro das cidades, ou seja na mobilidade urbana, existe margem para a implementação de medidas que nos permitam uma efetiva redução desta dependência, nomeadamente na aposta na ME.

Um outro aspeto, não menos importante, prende-se com o forte aumento do preço do barril de petróleo que se verificou desde ano de 2004 e cuja evolução se pode visualizar na figura (1.7), entre os anos de 2004 a 2011. [3]

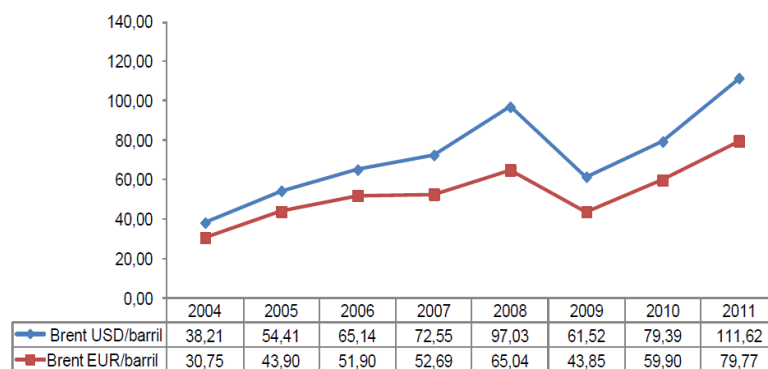


Figura 1.7 – Evolução do Preço do Barril de Brent entre 2004 a 2011- Fonte: DGGE

Da análise efetuada a esta evolução, constata-se que em comparação com os valores de 2004, o preço médio anual do barril de Brent teve um aumento de 159 %, chegando a 79,77 € no ano de 2011, mantendo uma tendência de subida repercutindo-se esta, obviamente no aumento no custo do litro do gasóleo rodoviário.

O uso dos combustíveis fósseis tem também uma outra problemática associada, a emissão de Gases de Efeito de Estufa (GEE), que tem como consequência direta o aquecimento global.

Na figura (1.8) apresenta-se a evolução em Portugal da emissão dos gases de Efeito de Estufa no conjunto de todos os setores de atividade (Indústrias de Energia, Indústrias Transformadoras e Construção, Transportes, Processos Industriais, Agricultura e Resíduos) registados entre ao anos de 1990 e 2010.

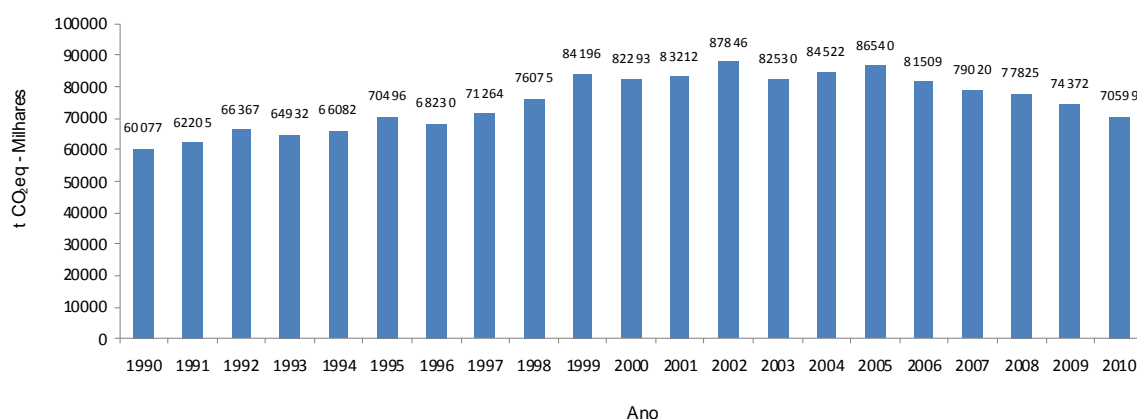


Figura 1.8 – Evolução anual da emissão total de Gases Efeito de Estufa (potencial de aquecimento global) em Portugal Fonte: www.Pordata.pt – (tratado pelo autor)

Da análise a esta evolução pode-se referir que esta evidencia uma tendência crescente até ao ano de 2002, atingindo nesse mesmo ano um valor de 87,846 Milhões de Toneladas de CO₂eq. Nos anos seguintes e até 2010 esta tendência inverteu-se, tendo atingido nesse ano um valor de 70,599 Milhões de Toneladas de CO₂eq. [4]

Essa redução é facilmente explicada pelo forte investimento que Portugal fez nas Industrias de Energia, nesta ultima década, onde a aposta em energias renováveis e na conversão de algumas centrais térmicas em centrais de ciclo combinado (Gás Natural) foi decisiva nesta evolução.

No setor dos transportes e conforme se pode verificar na figura (1.9), constata-se as mesmas tendências, ou seja crescente até ao ano de 2002 atingindo 20,260 Milhões de Toneladas de CO₂eq e decrescente desde daí até ao ano de 2010 com 18,936 Milhões de Toneladas de CO₂eq. [4]

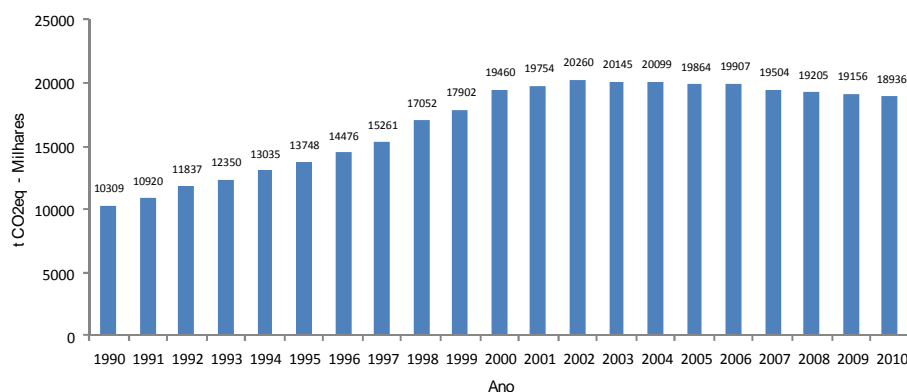


Figura 1.9 – Evolução anual da emissão de GEE no setor de transportes em Portugal
Fonte: www.Pordata.pt – (tratado pelo autor)

Esta tendência é facilmente explicada pela aplicação das Normas Euro cada vez mais restritivas, no que diz respeito às emissões destes gases. A tabela (1.1) apresenta a evolução das restrições às emissões de poluentes indicadas nas Normas Euro até à data de hoje.

Tabela 1.1 – Tabela EU para a emissão de motores de autocarros a diesel [5]

Norma	Data	CO	HC	NOx	PM	PM _{2.5}	Fumo
		(g/kWh)				µg/m ³	m ⁻¹
Euro I	1992<85kW	4,5	1,1	8,0	0,612	-	-
	1992>85kW	4,5	1,1	8,0	0,36	-	-
Euro II	Outubro 1996	4,0	1,1	7,0	0,25	-	-
	Outubro 1998	4,0	1,1	7,0	0,15	-	-
Euro III	Outubro 1999 só EEV ¹	1,5	0,25	2,0	0,02	-	0,15
Euro IV	Out. 2000	2,0	0,66	5,0	0,10	-	0,8
Euro IV	Out. 2005	1,5	0,46	3,5	0,02	25	0,5
Euro V	Out.2008	1,5	0,46	2,0	0,02	25	0,5

Obviamente que todo o contexto financeiro que o País atualmente atravessa, não será de todo alheio a esta evolução, tendo a sua quota-parte de responsabilidade. Neste sentido, será facilmente perceptível que estas contingências financeiras também se fizeram repercutir transversalmente nos outros setores de atividade, refletindo-se este fato na diminuição de emissões de GEE no conjunto de todos os setores de atividade.

¹ EEV=Enhanced environmentally friendly vehicle é um termo usado nas normas União Europeia para as emissões gasosas como definição de “veículo limpo” (Autocarro ou veículo pesado com mais de 3,5T).

Para além disto deve-se ainda aceitar que a aposta em ações que levaram a uma melhoria na eficiência energética em alguns setores, senão em todos, terá também ajudado à global redução das emissões.

Olhando mais concretamente para o setor dos Transportes e relacionando a emissão deste setor com emissão de todos os setores de atividade (total), verifica-se que esta relação tem tendencialmente aumentado desde o ano de 1990, ou seja, o peso das emissões no setor dos transportes nas emissões totais representava cerca de 17,2% no ano de 1990, passando para 26,8% no ano de 2010. A evolução desta relação encontra-se evidenciada na figura (1.10).

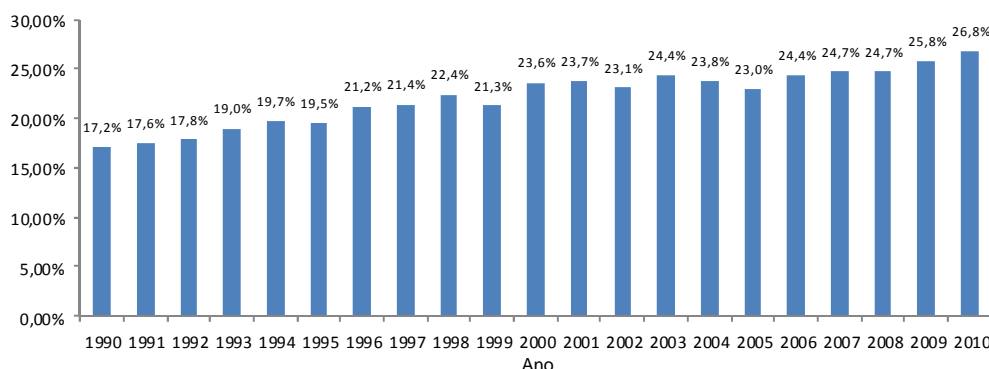


Figura 1.10 – Relação em % das evoluções anuais da emissão de GEE em Portugal no setor de transportes vs. Total – (tratado pelo autor)

Estes dados são reveladores que apesar de se estar a diminuir as emissões de um modo geral, a taxa de redução no setor dos transportes é muito inferior à taxa de redução do total de todos os setores de atividade. Daqui conclui-se que existe margem para neste setor se ir mais longe ao nível da redução das emissões de GEE.

Neste sentido é também evidente que sem medidas legislativas, regulamentares e até de incentivos diretos ou indiretos, todo este processo de redução do consumo de energia e consequentemente de emissões de GEE torna-se mais difícil de atingir.

Face a esta evidência, é imperativo a existência de regulamentação que imponha metas e objetivos, com vista a uma efetiva redução de emissões de GEE. Este processo de redução do consumo de energia deve passar pela aplicação de legislação, quer nacional quer inclusivamente comunitária.

1.1.2. Legislação Aplicável no contexto da Eficiência Energética

A Diretiva n.º 2006/32/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 5 de abril de 2006, relativa à eficiência na utilização final de energia e aos serviços energéticos e que revoga a Diretiva n.º 93/76/CEE, do Conselho, transposta pelo Decreto - Lei n.º 319/2009, de 3 de novembro, estabeleceu como objetivo geral indicativo a obtenção de economias de energia de 9% no nono ano de aplicação da Diretiva (2016), por comparação com o período 2001 -2005, Fixou também, no n.º 2 do artigo 14.º, a obrigação de os Estados-Membros apresentarem à Comissão, periodicamente, planos de ação de eficiência energética.

Em 20 de maio de 2008, foi aprovado pela Resolução do Conselho de Ministros n.º 80/2008, o primeiro PNAEE (Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética – PNAEE 2008) para o período de 2008-2015, tendo estabelecido como meta uma redução do consumo de energia final em 10% até 2015.

Em 2009 a União Europeia traçou um conjunto de metas (Energia/Clima), no âmbito da energia para o horizonte de 2020, também conhecida pela meta dos “três vintes” que se traduziam em três pontos: [6] [7]

- Reduzir os gases com efeito de estufa em 20% (até 2020);
- Alcançar 20% na utilização de energias renováveis no total de consumo energético (até 2020);
- Aumentar a eficiência energética, poupando 20% do consumo energético da UE (até 2020).

Estas metas deram lugar à Diretiva 2009/28/CE de 5 de junho que teve como base à promoção da utilização de energia proveniente de fontes renováveis a serem aplicados por todos os Estados Membros.

Esta Diretiva do Parlamento Europeu, vem alterar e subsequentemente revogar as Diretivas anteriores sobre esta matéria, nomeadamente as Diretivas 2001/77/CE e 2003/30/CE, tendo estabelecido no seu artigo 4.º, a obrigação de cada Estado-Membro aprovar (e notificar a Comissão) um plano nacional de ação para as energias renováveis. Este plano será responsável por fixar os objetivos nacionais para as quotas de energia proveniente de fontes renováveis consumida pelos setores da eletricidade, do aquecimento e arrefecimento e dos transportes no horizonte de 2020.

Esta diretiva propunha-se alcançar os seguintes objetivos:

- Estabelecer metas obrigatórias para a quota das FER no consumo final bruto de energia, em 2020 (20% como meta global da EU), incluindo uma quota específica de 10% para o sector dos transportes.
- Estabelecer a obrigação dos Estados Membros de aprovarem Planos de Acção Nacionais para as Energias Renováveis (PANER).
- Obrigar ao cumprimento de critérios de sustentabilidade para a contabilização da energia proveniente de biocombustíveis e de biolíquidos.

Em 15 de abril de 2010 e com o propósito de cumprir esta diretiva, é aprovada em Resolução de Ministros 29/2010 a Estratégia Nacional para a Energia (ENE2020), propondo-se esta a atingir os seguintes resultados. [1] [8] [9].

- Redução da dependência energética do país, face ao exterior para 74% no ano de 2020;

- Cumprir no contexto europeu os compromissos assumidos por Portugal, nomeadamente com a incorporação de 31% de energias renováveis na energia final consumida e redução de 20% no consumo de energia final;
- Redução do saldo importador energético com a energia produzida a partir de fontes endógenas em cerca de 25% (face ao ano de 2008), equivalendo a cerca de 2.000 Milhões de € na redução nas importações.

Neste âmbito em 30 de julho de 2010 foi aprovado o segundo PNAER, que foi objeto de comunicação à Comissão Europeia em 10 de agosto desse mesmo ano.

Embora quer o PNAEE 2008-2015 e o PNAER 2010, dando este último, cumprimento às medidas aprovadas na ENE2020, visarem o cumprimento das metas europeias «20 – 20 – 20», estes foram aprovados em contextos político-económicos diferentes do atual e com lógicas de planeamento distintas entre si. Julgou-se deste modo necessário e importante ajustá-los de forma integrada, potenciando sinergias que permitissem maximizar a eficácia e eficiência no aproveitamento de recursos humanos e financeiros escassos, neste novo contexto macroeconómico consequentemente mais exigente. [10]

Neste contexto, foi recentemente aprovada a Resolução do Conselho de Ministros de 20/2013 de 10 de abril, que aprova as principais linhas comuns à revisão do PNAEE e PNAER anteriores, aprovando deste modo os PNAEE 2016 e PNAER 2020, sendo as principais linhas comuns:

- O alinhamento dos objetivos dos Planos em função do consumo de energia primária;
- A eliminação de medidas de difícil implementação ou quantificação ou com impacto reduzido e sua substituição por novas medidas ou por um reforço de medidas já existentes de menor custo e maior facilidade de implementação;
- A avaliação estruturada dos impactos das medidas preconizadas por cada plano;
- A instituição de um sistema conjunto de acompanhamento e monitorização dos planos.

Este novo PNAEE (PNAEE 2016) parte dos resultados atingidos pelo seu antecessor (PNAEE 2008) e define uma meta mais ambiciosa, correspondente a uma redução de consumo da energia primária em 25% até 2020.

Para o efeito, foi feita uma análise do impacto (atual e potencial) estimado de todas as medidas previstas no PNAEE de 2008, de acordo com as normas europeias sobre a monitorização de planos e medidas de eficiência energética.

Nesta análise foram tidas em conta economias já geradas até ao ano de 2010. A nova meta para 2016 é de 1.501.305 tep, pelo que se conclui que a implementação do PNAEE 2008 permitiu atingir, em termos acumulados até 2010, 49% do novo objetivo traçado em apenas dois anos de exequibilidade. [10]

O PNAEE 2016 assenta deste modo sobre seis áreas e dez programas, sendo os Transportes uma das áreas abrangidas. As áreas e a energia poupada (em tep) estão indicadas na tabela (1.1). [10]

Tabela 1.1 – Resumo dos impactos do PNAEE 2016 por Áreas [28]

Área	Energia poupada (tep)	Meta 2016 (tep)	Execução em relação à meta de 2016
Transportes	252.959	1.501.305	49%
Residencial e Serviços	267.008		
Indústria	177.895		
Estado	9.902		
Comportamentos	21.313		
Total PNAEE	729.077		

O PNAEE 2016 promove a maioria das medidas previstas no PNAEE de 2008, ainda que algumas sofram alteração das respetivas metas ou a inclusão ou extinção de outras ações previstas, em função do seu estado e potencial de implementação face ao respetivo custo económico.

As medidas não implementadas e de difícil quantificação ou com impacto reduzido são eliminadas e substituídas por novas medidas ou por um reforço das medidas já existentes de menor custo e maior facilidade de implementação, o que maximiza a probabilidade de cumprimento das metas estabelecidas.

O principal objetivo do PNAEE 2016 é assim o de projetar novas ações e metas para 2016, que contemplam uma redução adicional de 1 501 305 (tep) de energia primária, em articulação com o PNAER 2020, integrando as preocupações relativas à redução de energia primária para o horizonte de 2020 constantes da Nova Diretiva Eficiência Energética, com base em três eixos de atuação:

- Ação, através da adequação das medidas ao atual contexto económico-financeiro, tendo em vista a redução do custo global do programa nacional de eficiência energética;
- Monitorização, através da revisão dos métodos de monitorização de resultados em conformidade com as diretrizes europeias e criação de uma visão macro do impacto do programa nacional de eficiência energética;
- Governação, através da redefinição do modelo de governação do PNAEE.

A execução na íntegra do PNAEE 2016 terá o mérito de promover o cumprimento dos objetivos do próprio plano, assim como os objetivos assumidos no âmbito do PNAER 2020, designadamente 31% de incorporação de FER no consumo final bruto de energia e 10% de FER no setor dos Transportes.

No que concerne em particular com a área dos Transportes, que no fundo é objeto de dissertação no presente documento, as potenciais economias expectáveis são de 344 088 tep (23% do total), estando integrados nesta área os seguintes programas de melhoria da eficiência energética:

- *Eco Carro*, que agrega as medidas direcionadas para a melhoria da eficiência energética nos veículos;
- *Mobilidade Urbana*, que abrange as medidas relacionadas com a necessidade de incentivar a utilização de transportes coletivos e de modos suaves de transporte em detrimento do transporte individual motorizado, com um enfoque particular nas zonas urbanas;
- *Sistema de Eficiência Energética nos Transportes*, que integra medidas que visam dinamizar a utilização das redes ferroviárias de passageiros, bem como a gestão energética das frotas de transportes.

Uma das medidas que integra o Sistema de Eficiência Energética nos Transportes, destaca-se o Regulamento de Gestão dos Consumos de Energia no Setor dos Transportes, aprovado pela Portaria n.º 228/90, de 27 de março, alterado pela Lei n.º 7/2013, de 22 de janeiro. Este Regulamento é aplicado a empresas de transporte e a empresas com frotas próprias, consumidoras intensivas de energia, cujo consumo energético durante o exercício do ano anterior tenha sido superior a 500 tep. Todas as empresas que atingirem este consumo energético são obrigados a efetuar Auditorias Energéticas e consequentemente estabelecer um Plano de Racionalização do consumo de energia, cobrindo este um período de 3 anos.

A revisão técnica deste regulamento está a ser avaliada e pode constituir um novo contributo com efeito nas metas pós 2016, pelo que presentemente, será uma ferramenta importante na melhoria da eficiência energética na área dos transportes, onde esta dissertação se enquadra.

Ao nível regional e local, após a adoção, em 2008, do Pacote Clima e Energia da UE, a Comissão Europeia lançou o Pacto de Autarcas para fomentar e apoiar os esforços das autarquias locais na implementação de políticas de energia sustentável. Os governos locais desempenham um papel crucial na diminuição dos efeitos das alterações climáticas, reforçado pelos 80% do consumo energético e de emissão de CO₂ está associado à atividade urbana. [7] [11]

Este pacto é o principal movimento europeu que envolve autarquias locais e regionais voluntariamente empenhadas no aumento da eficiência energética e na utilização de fontes de energias renováveis nos respetivos territórios. Através do seu compromisso, os Signatários assumem a pretensão de atingir e até ultrapassar o objetivo da União Europeia de redução de CO₂ em 20% até 2020. [11]

Dados de Associação Nacional de Municípios Portugueses revelam que até à data, subscreveram este pacto 74 Municípios Portugueses representando 4 078 446 habitantes, tornando-se Signatários deste após terem submetido, cada um deles, o seu Plano de Acção para as Energias Sustentáveis (PAES). [11]

O Município da Cidade de Coimbra aderiu ao Pacto de Autarcas em 24 de janeiro de 2011, apesar de ainda não ter submetido um Plano de Acção para as Energias Sustentáveis (PAES), pelo que ainda não é um Signatário deste programa.

Neste contexto, tem de ser desenvolvido um Plano de Acção para as Energias Sustentáveis (PAES) para futuramente ser submetido ao Pacto de Autarcas, sendo este um documento-chave em que o Signatário do Pacto salienta a forma como pretende atingir a sua meta de redução de CO₂ até 2020. O PAES define as atividades e medidas previstas para atingir as metas, assim como os prazos e responsabilidades atribuídos.

Este Plano visa localmente incentivar, promover e apoiar a implementação de medidas e projetos que nos levem a uma melhoria na eficiência energética, para que com o contributo de todos estas metas sejam atingidas no ano de 2020 ou se possível até antes, estando garantido o apoio ao nível do financiamento por parte da União Europeia.

O financiamento será efetuado através dos Fundos Europeus geridos a nível Nacional e Regional, onde se incluem os Fundos Estruturais e Fundo de Coesão. [11]

Este Plano de Acção para as Energias Sustentáveis (PAES), será documento vital, com o objetivo de reduzir as emissões de CO₂ até ao ano de 2020, por parte do município, ou municípios ou até comunidades intermunicipais, garantindo por outro lado a questão não menos importante do financiamento.

Um plano deste tipo terá de apresentar as diretrizes de como a autarquia ou autarquias podem reduzir o consumo de energia através de uma maior eficiência energéticas em diversas áreas, tais como a da gestão dos edifícios residenciais, comerciais e de serviços, em indústrias e transportes, aliando as respetivas medidas ao aumento da quota de energias renováveis.

Um Plano de Acção para as Energias Sustentáveis a nível local, deve assentar em três pontos:

- Caraterização Energética Municipal através da Matriz Energética

Visa efetuar a caraterização do balanço energético do concelho, identificando o consumo de energia verificado e dos custos associados, bem como dos recursos energéticos disponíveis, identificando localmente:

- a) Intensidade Energética verificada;

- Por tipo de Fonte;

- Por tipo de Atividade;

- b) Recursos Energéticos disponíveis;

- Potencial Hídrico;
- Potencial Eólico;
- Potencial Solar e Solar Térmico;
- Potencial de Biomassa;

- Medidas de Eficiência e Sustentabilidade Energética

Visa a sensibilização e promoção de ações e apoios de medidas de eficiência energética para um consumo de energia sustentável de todos os intervenientes do Concelho, otimizando os recursos disponíveis e diminuindo a chamada pegada ecológica e com incentivos ao nível dos impostos. Estas medidas deverão ser efetuadas:

a) Junto dos Municípios, Empresas e Entidades.

b) Na atividade Municipal;

- Instalações Municipais, incluindo uma gestão eficiente da frota de viaturas municipal;
- Iluminação Pública;
- Abastecimento Público de Água e Saneamento;
- Resíduos Sólidos Urbanos;
- Mobilidade e Transportes Urbanos;
 - Rede Geral;
 - Rede de Troleicarros.

- Perspetivação e Monitorização

Visa antecipar as atuais tendências no consumo de energias a curto (5 anos) e médio (10 anos) prazo e monitorizar a tendência real confirmando ou não do sucesso das medidas de sensibilização e promoção entretanto seguidas.

A implementação de um Plano de Acção para as Energias Sustentáveis a nível local será fundamental para a fomentar a eficiência energética em todos os setores de atividade e mais concretamente ao nível do setor de transportes local. Dotar o sistema de troleicarros da cidade de Coimbra com equipamentos ao nível das suas subestações de retificação energeticamente mais eficientes contribuirá decisivamente para tornar a mobilidade urbana da cidade menos dependente do consumo de energia primária e da sua problemática ambiental.

Paralelamente a implementação de um plano deste tipo permitirá que a Cidade de Coimbra se torne um dos Signatários do Programa de Autarcas, contribuindo de uma forma planeada para o sucesso do cumprimento das metas previstas no PNAEE 2016 e no PNAER 2020. Será este o caminho para tornar a cidade de Coimbra, numa cidade moderna, sustentável e ambientalmente saudável.

1.2. Os Troleicarros da Cidade de Coimbra

A história dos Troleicarros em Coimbra, remonta ao ano de 1943. Nesse ano é pela primeira vez feita referência a este tipo de transporte, com vista à expansão do Serviço de Transportes Urbanos a outras zonas da cidade que davam mostras de crescimento populacional, mantendo a tração elétrica, por um lado, e por outro substituir progressivamente a rede de carros elétricos, que davam mostras de desgaste no material, depois de 22 anos de serviço, conjuntamente com as suas inerentes limitações.

Em 1945, o Conselho de Administração dos Serviços Municipalizados de Coimbra, presidido pelo Dr. Alberto Sá de Oliveira, cargo acumulado com o de Presidente da Câmara Municipal, delibera a aquisição de dois troleicarros para os Serviços de Transportes Coletivos e de informar a Câmara desta deliberação. [12]

Nesse mesmo ano, em 9 de janeiro, por proposta do Sr. Presidente da Câmara de Coimbra, é apresentada em reunião camarária uma proposta para a obtenção de um empréstimo de 10.000 contos com vista ao alargamento da rede de Serviços de Transporte Coletivos Urbanos e para a substituição progressiva dos carros elétricos, por outros que dispensassem carris. [12]

Este programa, incluía a construção de uma nova linha aérea de dois condutores, para ligação da Baixa de Coimbra até ao Alto de Santa Clara, via Ponte Metálica sobre o Mondego.

A necessidade da dispensa de carris, prendia-se com dois fatores. O primeiro era do indeferimento por parte da Junta Autónoma de Estradas, através da sua Divisão de Ponte (que detinha a jurisdição da Ponte Metálica sobre o Mondego Santa Clara), para a instalação de carris e por outro lado era o cruzamento de linhas de bitolas diferentes entre a ligação ferroviária da Linha da Lousã e o sistema de carris dos elétricos da Cidade de Coimbra. Com aquisição dos troleicarros, estas questões ficariam resolvidas. Para além disto, foi também deliberado que se considerasse a aquisição de mais seis unidades de troleicarros. [12]



Figura 1.11 – Troleicarro Sécheron e chassis e carroçaria Saurer, em linha em <http://ehgarde.planetaclix.pt/trolleybus/imagenspt/cbSecheron21bCliffEssex.jpg/> em 09.09.2013

Em 16 de agosto de 1947 é inaugurada a 1ª linha de troleicarros de Coimbra entre a Estação Nova (atualmente Coimbra-A) até ao cruzamento das Almas de Freire, no Alto de Santa Clara, numa extensão de 3 200 metros, que se vem a denominar como Linha nº6. Nesta linha passam a circular duas viaturas de fabrico Suíço, com equipamento elétrico e mecânico *Sécheron* e com chassis e carroçaria *Saurer*, modelo único e exclusivo para a Cidade de Coimbra. [12]



Figura 1.12 – Troleicarro a atravessar a Ponte Metálica sobre o Mondego, em linha em <http://ehgarde.no.sapo.pt/trolleybus/imagenspt/cblinha6.jpg>, em 09.09.2013

A Cidade de Coimbra torna-se assim na primeira cidade da Península Ibérica a ter uma rede de troleicarros no transporte de passageiros. [12]

Em 18 de dezembro de 1947, a Câmara Municipal de Coimbra delibera a gradual extinção da via-férrea de “carros elétricos”, efetivando-se esta no dia 9 de janeiro de 1980, com a recolha ao depósito de viaturas o último elétrico que havia prestado serviço na cidade. [12]

O sistema de troleicarros na cidade vai-se ampliando e renovando com a entrada ao serviço de novas viaturas, sendo de realçar as seguintes datas:

- No dia 10 de março de 1951 entram ao serviço 6 novas viaturas *British Thompson-Houston (BTH)*.
- Durante o ano de 1954 entram ao serviço 3 novas viaturas *British United Traction (BUT)*, com chassi *Leyland*.
- Durante o ano de 1957 entram ao serviço 3 novas viaturas *BUT*
- Durante o ano de 1961 entram ao serviço 6 novas viaturas *BUT*
- Em 1974 as viaturas *Sunbeam/BTH* e a primeira remessa *Leyland/BUT*, são renovadas na Salvador Caetano e recebem uma carroçaria totalmente nova.
- Final dos anos 70, aquisição de dois troleicarros *Henschel* da rede de troleicarros de Braga (que serviram para peças de reposição).

- Entre março de 1984 e Dezembro de 1985, entrada ao serviço de 20 viaturas novas *Salvador Caetano/Efacec*.
- Durante o ano de 2001, foi efetuado a recuperação/restauro de 17 viaturas *Salvador Caetano/Efacec*.
- Final do ano de 2003, entrada em serviço, cedidas a título de empréstimo de 2 viaturas *Salvador Caetano/Efacec*, pelos STCP, uma articulada e outra simples
- Final do ano de 2009, entrada ao serviço de um troleicarro *Trollino Solaris*



Figura 1.13 – Troleicarro British United Traction (BUT), com chassi Leyland, em linha em <http://ehgarde.planetaclix.pt/trolleybus/imagenspt/cbBUT37CarlosLima.jpg>, em 09.09.2013

O final da década de 80 e o início da década de 90, do século passado foram a época de ouro do serviço de Troleicarros na cidade de Coimbra.

No ano de 1991 são percorridos 890 mil quilómetros e transportados mais de 10 milhões de passageiros. No ano seguinte são mais de 1 milhão de quilómetros percorridos e 11 milhões de passageiros transportados [12].



Figura 1.14 – Troleicarro Sunbeam/BTH, em linha em <http://ehgarde.planetaclix.pt/trolleybus/imagenspt/cbBUT46a.jpg> em 09.09.2013

Após esta data, o número de troleicarros começa a diminuir rapidamente até porque existem nesta altura viaturas com mais de 40 anos de serviço. Aos nossos dias chegam apenas quinze troleicarros em serviço, catorze viaturas *Salvador Caetano/Efacec.*, com cerca de 28 anos de serviço e uma mais recente, *Trollino Solaris* com cerca de 3 anos.



Figura 1.15 – Troleicarro Salvador Caetano/Efacec junto ao Mercado D. Pedro V, em linha em http://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Coimbra_trolley.jpg, em 09.09.2013



Figura 1.16 – Troleicarro Trollino/Solaris na *Linha nº 4* em linha em http://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Trolino_Coimbra.jpg em 09.09.2013

No ano de 2012, de acordo com o Relatório de Gestão dos Serviços Municipalizados da Cidade de Coimbra transportaram um total de 14,083 milhões de passageiros, tendo as viaturas troleicarro, transportado 623 mil passageiros e percorrido cerca de 161 mil quilómetros. [13].

Constata-se que, apesar do fulgor de outros tempos, nomeadamente do final da década de 80, início da década de 90, conforme já referenciado, os troleicarros ocupam ainda um lugar muito importante no transporte de passageiros na Cidade de Coimbra, apesar da idade já avançada de algumas das suas viaturas. De realçar que não existem viaturas a gasóleo com esta idade ainda em serviço, comprovando deste modo a sua longevidade.

1.3. Objetivos

Pretende-se então com este trabalho apresentar contributos para tornar a rede de tração dos Troleicarros da Cidade de Coimbra, mais concretamente as suas subestações de retificação, mais eficientes e fiáveis e por conseguinte aumentar a sua sustentabilidade ambiental. Isto resultará numa exploração do sistema com um menor custo no consumo de energia (kWh), quer por quilómetro, quer por passageiro transportado e que se traduzirá a um menor custo financeiro com o consumo de energia.

Deste modo os objetivos deste trabalho são a identificação de soluções que nos permitem otimizar o consumo de energia elétrica das subestações de retificação associadas à indicação do retorno económico de cada uma das soluções preconizadas, avaliando assim a viabilidade tecno-económica destas soluções e indicando quer técnica, quer financeiramente a melhor opção a adotar.

1.4. Estrutura de Dissertação

A presente Dissertação está dividida em quatro partes, sendo finalizada por uma conclusão.

No Capítulo 2, é apresentado o Estado da Arte, descrevendo sucintamente os aspetos técnicos e teóricos relativos a viaturas (tróleys) e das subestações retificadoras, identificando as tendências destes equipamentos, que presentemente vão aparecendo na implementação das novas redes de tração em execução ou executadas muito recentemente na Europa e no Mundo.

A descrição e o enquadramento dos problemas da rede de Troleicarros da Cidade de Coimbra são apresentados no Capítulo 3, onde se caracteriza a rede existente, as subestações e a localização destas, bem como a sua área de influência. Para além disso, é apresentado também as linhas em serviço e a sua planimetria, um fato que poderá ter relevância na exploração e otimização da operação em serviço, nomeadamente pelo aproveitamento da energia de travagem regenerativa. Neste ponto é também apresentado como problema a questão ambiental e de saúde pública recorrente da utilização do mercúrio, face à legislação recente, na retificação na obtenção de corrente elétrica por retificação, em particular na Subestação de Montarroio.

No Capítulo 4 é apresentado a análise da operação das subestações retificadoras da rede de troleicarros da Cidade de Coimbra. Este capítulo tem como objetivo o dimensionamento das subestações analisadas. Neste aspeto há dois pontos que tiveram de ser vistos. Um deles e talvez o mais crítico prende-se com o regime transitório decorrente do período de arranque das viaturas. Neste sentido, será crucial dimensionar as subestações tendo em vista a garantia de que na situação mais desfavorável encontrada, decorrente destes arranques, o regime de sobrecarga previsto seja satisfeito em qualquer das subestações. É neste período que o

consumo das viaturas é superior ao regime nominal, tanto mais quanto uma parte considerável dos percursos de cada uma das linhas é efetuada em subida. Assim, é importante determinar, em primeiro lugar o número de viaturas que se encontram em processo de subida durante o mesmo período, qual a subestação solicitada, verificar o número de arranques máximos que se poderão verificar em cada uma das linhas. Modelizar estatisticamente o número de arranques simultâneos para o número máximo de viaturas encontradas nessa situação, de forma a termos indicação do número de arranques máximos esperados. Finalmente monitorizar numa operação real, o número de arranques dessas viaturas, sua localização dentro do trajeto de subida em relação às outras, e a sua evolução temporal. Deste modo, conhecendo o modelo obtido poder-se-á perspetivar se este se encontra dentro dos limites de sobrecarga previstos para a subestação e caso se confirme, então o modelo real, menos exigente, também irá de encontro às necessidades do funcionamento.

Para além desta abordagem, apresentamos o segundo ponto de análise e que contempla a Metodologia seguida desde a recolha de dados, através da análise das faturas de energia, até aos resultados evidenciados pelas medições efetuadas “*in situ*” durante o normal funcionamento da rede de tração, que se traduzem por medições efetuadas por integração de períodos de quarto de hora. Estas monitorizações foram levadas a cabo simultaneamente nas duas subestações durante uma semana de operação. Os dados recolhidos permitem chegar aos consumos das potências ativa, reativa e de saída (P_{dc}) e também aos parâmetros de eficiência das subestações. Os parâmetros estudados foram a distorção harmónica, o rendimento e o fator de potência, para cada um dos retificadores existentes nas subestações. Será na análise e no compromisso entre estes dois regimes de operação que chegaremos ao dimensionamento dos equipamentos, dentro dos parâmetros de sobrecarga das subestações de retificação.

No Capítulo 5 apresentam-se as medidas que se poderão adotar. Para além disso, pretende-se também ajustar a potência tomada do sistema à carga efetiva verificada. Também aqui haverá lugar à redução da fatura energética. Para cada medida é apresentado a taxa de retorno do investimento (*TIR*) e um valor atual líquido (*VAL*), que ajudarão à decisão sobre qual a melhor opção de investimento.

2. ESTADO DA ARTE

2.1. Considerações Gerais

Os Troleicarros de hoje são muito diferentes dos equipamentos de outrora. O domínio da eletrónica de potência associada aos microprocessadores e eletrónica digital bem como os variadores eletrónicos de velocidade associados aos motores de corrente alternada permitem ter hoje viaturas extremamente fiáveis e bastante eficientes sob o ponto de vista energético e por conseguinte, também ambiental.

Neste sentido, as novas viaturas troleicarro são dotadas de regeneração de energia, possível nas travagens ou descidas, permitindo deste modo um contributo importante para a eficiência energética com vista à redução de consumo de energia. [14]

A energia regenerada pode ser injetada na rede de tração e ser consumida por outra viatura que esteja a circular. Isto contrasta com as viaturas mais antigas, dotadas de outro tipo de tecnologia de comando que dissipam a energia gerada, por efeito de Joule (calor), por meio de resistências, normalmente instaladas sobre o tejadilho.

Este é um outro aspeto que poder-se-á futuramente ter em conta na cidade de Coimbra, em futuras aquisições de troleicarros ou até na remodelação das viaturas existentes, em que, devido à sua orografia quase que é possível no seu trajeto descendente, que estas funcionem como “geradores” de energia, “alimentando” outras que se encontram em trajeto ascendente.

Um outro ponto importante é o conforto proporcionado por esta nova geração de viaturas. A aceleração constante, sem solavancos associado ao baixo ruído produzido, torna a utilização destas, sob o ponto de vista do utilizador, numa experiência francamente confortável e agradável. Não se pode esquecer que o ruído provocado pela mobilidade urbana não deixa de ser, por si só uma problemática, não menos importante nas cidades. [7]

Em paralelo com o desenvolvimento deste tipo de viaturas, os próprios sistemas de retificação e de conversão sofreram muitas e importantes evoluções ao longo do tempo. Desde a retificação baseada no funcionamento de ampolas de mercúrio, passando pela retificação a díodos, tirístores e mais recentemente a IGBT². Estes sistemas demonstram uma grande evolução, em particular na utilização dos tirístores e dos IGBT, em que se torna possível controlar o seu funcionamento, por forma a regular a tensão de saída ou tornar o conversor reversível. Contudo esta possibilidade de controlar o funcionamento dos elementos retificadores, para o caso particular das redes de tração constata-se que não é uma questão essencial, ou até mesmo relevante.

² *Insulated Gate Bipolar Transistor* ou, em Português *Transístor Bipolar de Porta Isolada*

Esta evolução tornou estes tipos de equipamentos muito mais compactos, robustos e mais leves, por um lado, e por outro dotou-os de rendimentos acima dos 95%, garantindo por este meio uma assinalável eficiência energética.

É neste sentido que este capítulo se desenvolve. A abordagem a este tema leva necessariamente à indicação das tendências, quer ao nível das viaturas quer às tecnologias que se poderão implementar nas subestações de retificação. Um outro ponto importante será também perceber o que se está a implementar pelo mundo e em particular na Europa. Quais as opções que ao nível do transporte urbano de passageiros estão a ser seguidas, quer em cidades com redes troleicarro já implementadas, quer noutras onde nunca tiveram este tipo de mobilidade como opção e que agora a estão a adotar.

2.2. Os Troleicarros Modernos

Não sendo este o tema central e objeto desta dissertação, pretende-se nesta seção, dar uma ideia da evolução que estas viaturas e mais concretamente os seus constituintes mais importantes, evoluíram até aos nossos dias, incluindo a identificação de algumas evoluções, sempre com o objetivo de dotar estas viaturas de uma melhor eficiência energética.

O troleicarro define-se como um veículo tradicionalmente utilizado para o transporte coletivo de passageiros, em tudo semelhante a um autocarro convencional, mas dotado de tração elétrica, alimentado por meio de um par de condutores aéreos que conduzem até este, através de duas varas, a energia elétrica necessária para a sua deslocação. A tensão normal de alimentação da tração elétrica destas viaturas situa-se entre 600 a 750 V_{dc}. [5]

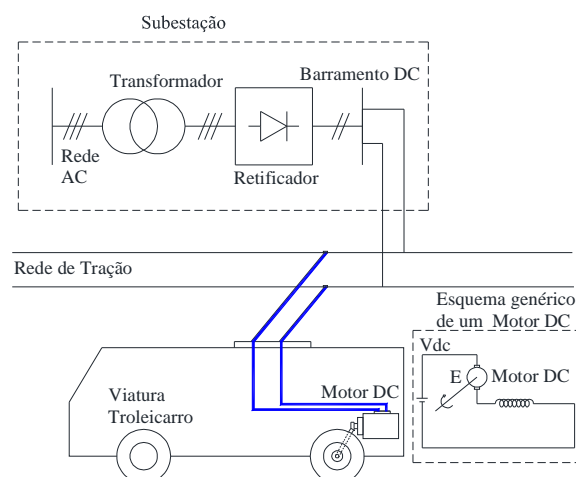


Figura 2.1 – Esquema exemplificativo de uma rede de tração de troleicarros genérica com tração de motor de corrente contínua

Apesar de este ser o seu modo de funcionamento normal é bastante comum encontrar um meio de locomoção alternativo nos troleicarros, ou por intermédio de um grupo térmico diesel ou então mais recentemente por meio de baterias, ou outros sistemas de armazenamento de energia, como é o caso de supercondensados. [14] [15] [16] [17] [18]

O sistema alternativo baseado num grupo térmico a diesel é acoplado a um alternador, que gera a corrente alternada quando se encontra em funcionamento, e retifica para corrente contínua, por meio de um conversor estático existente na viatura, sendo denominado por um sistema alternativo diesel-elétrico. No caso de existência de baterias ou outro sistema de armazenamento, este fornece diretamente a corrente contínua solicitada pelo sistema de tração.

Este modo alternativo permite a mobilidade do troleicarro em situações de emergência ou de manobras ou então em funcionamento normal, em zonas em que não é possível ou desejável a existência das linhas aéreas. Para além dessas situações é também utilizado em situações de ponta de serviço, onde por vezes pode existir a impossibilidade de este se “ligar” à rede de tração, garantindo assim a continuação da operação.

O princípio de funcionamento de um troleicarro moderno não é muito diferente do funcionamento de um troleicarro mais antigo, mas atualmente e face à tecnologia existente, estão implementados alguns melhoramentos sob o ponto de vista da eficiência energética, nomeadamente ao nível do tipo de motores instalados e consequentemente do sistema de controlo dos mesmos.

Este controlo foi evoluindo ao longo dos últimos quarenta anos, onde se destacam as vantagens e as desvantagens mais significativas de cada uma das etapas e evoluções, em particular ao nível dos sistemas de controlo e que de uma forma simplificada se passam seguidamente a identificar; [19]

- Até ao final dos anos 70 do século passado:

O controlo do motor de tração era efetuado por “reóstato”, conforme se pode visualizar na figura (2.2).

Vantagens: Simplicidade e robustez na implementação e operação;
 Sistema de regulação simples.

Desvantagens: Necessidade de manutenção elevada;
 Elevado consumo energético;
 Impossibilidade de efetuar a travagem regenerativa;
 Existência de solavancos no “para-arranca” da marcha.



Figura 2.2 – Pormenor de controlo por “reóstato” em linha em http://www.trolleymotion.ch/fileadmin/user_upload/documents/uitp/Vytous_Cegelec.pdf, em 16.09.2013

- Após os anos 70 e até meados dos anos 90 do século passado:

Controlo efetuado por conversor DC-DC, em que a regulação da tensão do motor de tração de corrente contínua é efetuada através de eletrónica de potência, conforme se apresenta na figura (2.3).

Vantagens:

- Elevada eficiência energética durante a operação;
- Pouca manutenção, principalmente ao nível do conversor;
- Possibilidade de travagem regenerativa (com operação do conversor DC-DC em quatro quadrantes);
- Operação suave de pára-arranca da viatura;

Desvantagens:

- Manutenção dos motores DC e contactores
- Motor DC de “construção aberta”, aumentado o risco de possibilidade de deterioração das condições de isolamento do equipamento, por manutenção deficiente e alteração das características do motor;

Neste ponto acresce ainda indicar a relativa facilidade de conversão de troleicarros equipados com conversores DC-DC de dois quadrantes em conversores DC-DC de quatro quadrantes. Esta conversão melhora significativamente a redução do consumo de energia elétrica, através da regeneração de energia podendo esta ser injetada na rede de tração. [17]



Figura 2.3 – Pormenor de controlo por “conversores DC-DC” em linha em http://www.trolley-motion.ch/fileadmin/user_upload/documents/uitp/Vytous_Cegelec.pdf, em 16.09.2013

- Desde meados dos anos 90 do século passado até aos nossos dias:

Controlo efetuado por inversores de tensão, de quatro quadrantes, utilizando IGBT's, controlados por microprocessadores, em que a tensão DC da rede de tração é convertida na própria viatura num sistema AC trifásico, que alimenta os motores de corrente alternada (tipicamente de indução), sendo o controlo destes efetuado por variadores eletrónicos de velocidade.

<i>Vantagens:</i>	Considerável poupança energética durante a operação; Elevada fiabilidade; Travagem regenerativa; Motores AC sem manutenção e de fácil substituição e possibilidade de travagem eletrodinâmica até 0,5km/h. Operação suave de “para-arranca” da viatura;
<i>Desvantagens:</i>	Equipa de manutenção especializada, com custos mais elevados ao nível da formação;

É perceptível a existência de duas fases na evolução dos troleicarros. A primeira, que vai sensivelmente até ao início dos anos 80 do século passado, em que o equipamento de tração baseia-se na implementação de um motor de corrente contínua, com os seus constituintes de

controlo. Posteriormente e até aos nossos dias o funcionamento é baseado na implementação de motores AC, também estes equipados com as suas estratégias e equipamentos de controlo.

Esta evolução deve-se sobretudo ao domínio no controlo da variação eletrónica de velocidade para o acionamento dos motores AC. Este domínio, em associação à fácil implementação dos inversores de tensão e à sua alta fiabilidade, são um forte contributo para um menor custo de manutenção e também para uma menor perda de energia por efeito de joule, aumentando deste modo a eficiência dos troleicarros. Para além disto, importa ainda acrescentar que a minimização dos equipamentos eletrónicos constituintes dos sistemas de controlo favorece a utilização crescente deste tipo de equipamentos. [17]

Um fato comum e que se salienta é a utilização de apenas um equipamento de tração. Este é acoplado mecanicamente a uma caixa de velocidades instalado no chassis e ligado a um veio motor que atua mecanicamente no eixo motriz através de um diferencial mecânico, seja ele motor de corrente contínua ou motor de indução.

Contudo, hoje em dia há já uma tendência de algumas empresas construtoras implementarem motores de indução nos cubos das rodas, tal como nos mais desenvolvidos carros elétricos.

A utilização crescente deste tipo de montagem mostra a preocupação em tornar o veículo ainda mais eficiente, pois evita a necessidade de haver qualquer sistema mecânico de desmultiplicação ou de diferencial mecânico para a transmissão do movimento às rodas motrizes, eliminando deste modo as perdas mecânicas associadas.

A função do diferencial é garantida e gerida pelos controladores de tração existentes em cada uma das rodas motrizes. [5]

Uma implementação deste tipo pode ser visualizada na figura (2.4).

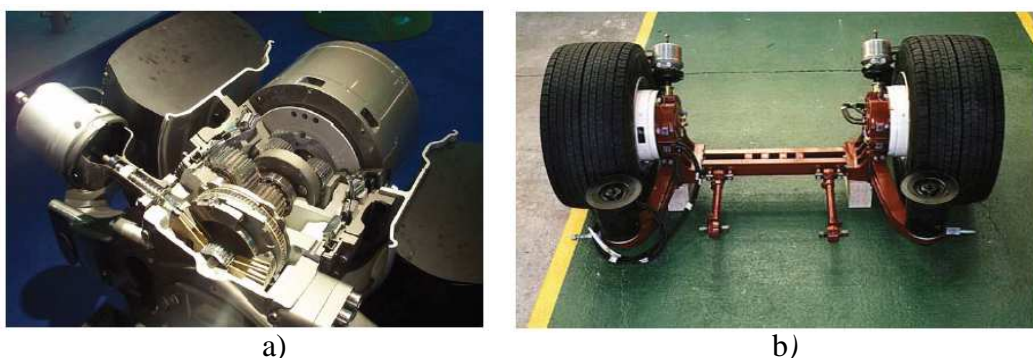


Figura 2.4 – a) Pormenor de motor elétrico de tração instalado num cubo de roda
b) Imagem de rodas motorizadas de um troleicarro moderno, em linha em http://www.trolleybus.ch/fileadmin/user_upload/documents/uitp/Grand_Irisbus.pdf em 16.09.2013

Esquematicamente pode-se ver na figura (2.5) o funcionamento dos diversos componentes elétricos e eletrónicos de um troleicarro com estas características implementadas.

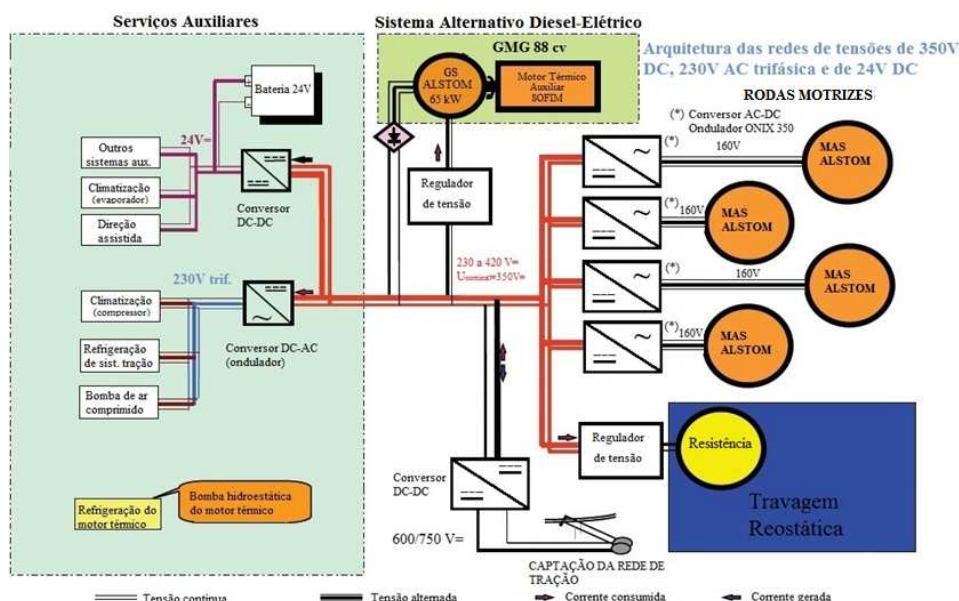


Figura 2.5 – Esquema de funcionamento dos diversos componentes eletromecânicos de um troleicarro moderno de 18m da Irisbus Iveco, controlado por “inversor de tensão”, em linha em http://www.trolleyemotion.ch/fileadmin/user_upload/documents/uitp/Grand_Irisbus.pdf em 16.09.2013 - (tratado pelo autor).

2.3. A Realidade Atual na Utilização de Troleicarros

Atualmente cerca de 40 000 veículos estão em operação em cerca de 310 cidades, distribuídas por cerca de 47 países tão diferentes como a Rússia, o Canadá, o Equador, o México, a Nova Zelândia, a China, a Grécia e alguns países da Europa de Leste. [20]

A Europa³ é responsável pela existência de 151 sistemas de troleicarros de onde resultam cerca de 1 186 linhas em serviço, encontrando-se a sua grande maioria instalada e em pleno funcionamento em países de Leste, Norte e Centro da Europa. [5]

O país com maior frota de troleicarros em serviço é a Rússia⁴, com cerca de 12 661 viaturas em funcionamento e onde se encontram em funcionamento duas das três maiores redes de troleicarro do mundo, em Moscovo e em S. Petersburgo. [5]

A Cidade de Moscovo é dotada de 1 598 veículos a circular em cerca de 1 275 km de linhas distribuídas em 97 carreiras e a Cidade de S. Petersburgo, com cerca de 823 viaturas em 51 percursos diferentes. [5] [21]

Existem ainda dois outros sistemas que, sendo muito menores, quer em dimensão, quer no número de cidades, têm no troleicarro o seu transporte de excelência, a Suíça e a Itália. [5]

³ Nestes valores não estão incluídos os referentes à Federação da Rússia, República do Cazaquistão, República da Arménia, Geórgia, Quirguistão, Tadjiquistão e Uzbequistão.

⁴ Nestes valores estão incluídos também os referentes às viaturas e linhas em serviços na República do Cazaquistão, República da Arménia, Geórgia, Quirguistão, Tadjiquistão e Uzbequistão.

No caso da Suíça, os sistemas atualmente em serviço são 13, com 503 veículos a circular em 53 linhas diferentes. Salienta-se a cidade de Lausanne que conta atualmente com 11 linhas de troleicarros e 92 viaturas. [21]

Em Itália por sua vez, existem atualmente em serviço 15 sistemas em 14 cidades⁵ e a circulação de 510 viaturas. De referir que a Cidade de Milão com apenas 4 linhas, tem ao serviço 141 viaturas. [5] [21]

A aposta em sistemas de troleicarros, tem sido uma opção cada vez mais na ordem do dia, também em cidades em que estes sistemas já existem ou até coexistam com outros sistemas, nomeadamente com viaturas a gásóleo.

Um estudo apresentado no evento *Eurobus Expo 2006*, promovido pelo *International Trolleybus Group*, que decorreu em *Birmingham* de 7 a 9 de novembro de 2006, e tendo por base um estudo efetuado em 2003, por parte da empresa de transportes públicos da cidade de Salzburgo (*Salzburger Lokalbahn*), concluiu que a melhor solução de mobilidade nesta cidade seria a adoção de viaturas troleicarro, que até então coexistiam com viaturas a gásóleo. O estudo em questão teve em conta a comparação entre os custos de aquisição e exploração de viaturas a gásóleos verificados durante o ano de 2003 comparativamente com viaturas troleicarro, considerando o ciclo de vida de cada uma delas. [22]

Esta comparação é apresentada na figura (2.6) seguinte e contempla a comparação entre troleicarros articulados e viaturas articuladas a gásóleo.

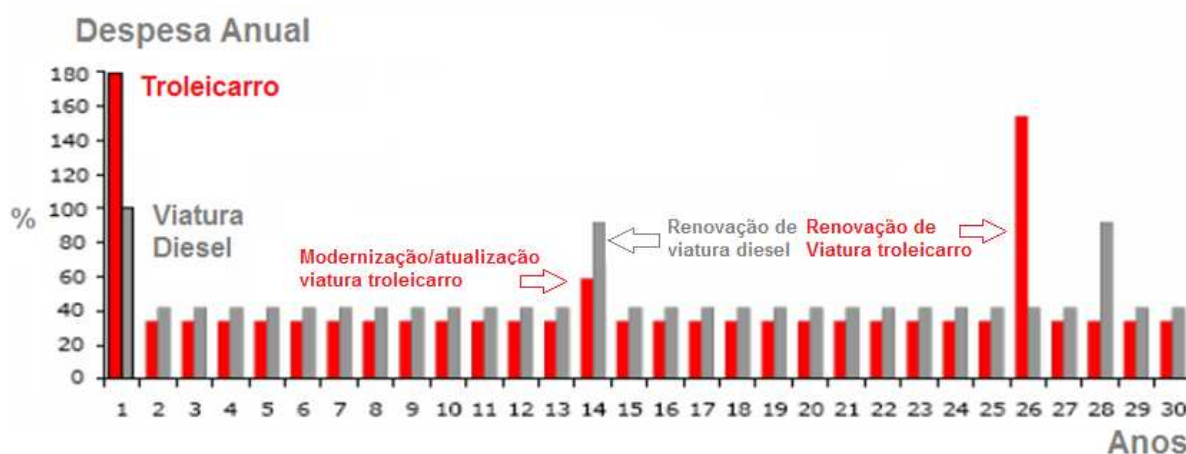


Figura 2.6 – Comparação de custos de exploração anual entre troleicarros articulados e viaturas articuladas a gásóleo, em linha em

http://www.trolleybus.ch/fileadmin/user_upload/documents/Trolleybuses_eurobus_2006.pdf
em 16.09.2013 - (tratado pelo autor)

⁵ A Cidade de Nápoles tem dois sistemas independentes.

Na tabela (2.1) são apresentados os custos por tipo de viatura levado a efeito para o estudo em questão.

Tabela 2.1 – Custos por viatura considerados para efeitos do estudo levado a cabo na Cidade de Salzburgo – Preços de 2003 em linha em http://www.trolley-motion.ch/fileadmin/user_upload/documents/Trolleybuses_eurobus_2006.pdf em 16.09.2013 - (tratado pelo autor)

	Troleicarro Articulado Standard 20 anos	Troleicarro com equipamento auxiliar 20 anos	Viatura Diesel articulada 13 anos
Média de km efetuados - 2003	50.000 km	50.000 km	50.000 km
Custo de aquisição (em Euros)	500.000 € (approx £350,000)	550.000€ (Approx £385,000)	330.000€ (approx £231,000)
Retorno do Investimento (considerado)	4% / 20 anos		4% / 13 anos
Preço da Energia (Salzburgo)	0,073€/kWh		0,73€/litro
Consumo/km	2,3 kW/km		0,60 litros/km
Tipo de Infraestrutura	Linha aérea e subestações de retificação		Bomba de Combustível

Deste estudo ressaltou uma realidade que não era de toda uma novidade. Uma viatura troleicarro tem uma vida útil muito superior ao das viaturas a gasóleo, em norma quase o dobro, obrigando a necessidade da remodelação da frota de viaturas a gasóleo, sensivelmente em metade do tempo de vida útil de uma viatura troleicarro. [22]

No que diz respeito aos custos anuais decorrentes com o consumo energético e manutenções, este é mais elevado nas viaturas a gasóleo. A estes dados acrescenta-se ainda uma agravante de estas não contribuírem para medidas sustentáveis para o ambiente, comparativamente com as viaturas troleicarro.

Para além do que já foi referido, existe ainda um outro fator a ter em conta e importante na ótica da otimização de gestão de frotas por parte das entidades e empresas gestoras das redes de transportes, trata-se do número de quilómetros anual percorrido por cada viatura.

Neste sentido, o estudo chegou também à conclusão de que a utilização de viaturas troleicarro torna-se economicamente mais vantajosa a partir dos 50 000 km percorridos por ano e por viatura, por comparação com viaturas a gasóleo, em circuito semelhante.

Este estudo levou a que no ano de 2005 a empresa *Salzburger Lokalbahn* tomasse uma decisão sobre a sua rede de transportes, tendo abolido todas as viaturas a gasóleo por ter chegado à conclusão que quando geridos eficientemente as viaturas troleicarros são economicamente mais vantajosas do que as viaturas a gasóleo.

Presentemente esta empresa é responsável por 148,7 km de linha aérea, onde operam 81 viaturas troleicarros articulados e 54 viaturas troleicarros simples. [22]

Mas este fenómeno, decorrente da utilização de viaturas troleicarro não existe só na Europa. No resto do mundo, são dignas de referência os seguintes sistemas com viaturas troleicarro: [5] [21] [23]

- América do Norte, onde se regista a rede de Filadélfia, a segunda mais antiga em serviço no mundo (desde 1923.10.14) com 88 viaturas, a de Seattle, com cerca de 159 e a de S. Francisco com 313 viaturas, Vancouver (Canadá) com 262 viaturas (em funcionamento desde 1948.08.48)
- Brasil, S. Paulo com 279 viaturas;
- Ásia e Oceânia, há que referir as cidades, de Pequim (660 viaturas), Guangzhou (300 viaturas), Wuhan (236 viaturas), Luoyang (90 viaturas) todos na China; Piong-Yang, na Coreia do Norte, com mais de 300 viaturas e Wellington na Nova Zelândia a mais remota rede de troleicarros, que conta com 60 viaturas em 9 linhas, numa rede de cerca de 50 km de extensão.

Um caso paradoxal é a situação de países referenciados e produtores de petróleo, como são os casos da Rússia, do Brasil do Irão⁶ com 5 linhas e 66 viaturas (na Cidade de Teerão), Venezuela, com 2 sistemas e 125 viaturas, o Equador com 5 linhas e 115 viaturas e mais recentemente da Arábia Saudita com 1 linha e 12 viaturas (na Cidade de Riad). [21]

A crescente utilização deste tipo de viaturas nestes países é representativa da importância que este tipo de transporte tem também para países que são ricos na produção de petróleo, algo que seria provavelmente impensável do ponto de vista económico.

Retomando os exemplos europeus, mais concretamente, a implementação de novas linhas e contrariamente ao que se possa pensar, nesta última década foram implementadas cinco novas linhas de troleicarros. As novas linhas pertencem a cidades como as de *Landskrona* (Suécia) em 2003, *Kerch/Kertsch* (Ucrânia) em 2004, *Roma* (Itália) em 2005, *Castellón* (Espanha) em 2008 e mais recentemente a cidade de *Lecce* (Itália) em 2012. [21]

De salientar um fato curioso e interessante da cidade de Roma, que em meados dos anos cinquenta do século passado “trocou” as viaturas troleicarro em serviço nalgumas das suas linhas, por viaturas de transportes urbano, movidas a diesel, mas em 2005 assistiu-se a um volte face desta opção, com a aposta novamente em viaturas troleicarro. [20] [21]

2.3.1 Novas Linhas de Troleicarros na Europa

2.3.1.1 Landskrona (Suécia) em 2003

Nesta cidade está em funcionamento uma única linha de troleicarros, desde o ano de 2003, que estabelece ligação entre o centro da cidade à estação ferroviária mais próxima. Esta linha tem 3,7 km de extensão. [21]

⁶ Organização de Países Exportadores de Petróleo tem como membros atualmente ativos os seguintes países Angola, Arábia Saudita, Argélia, Catar, Emirados Árabes Unidos, Equador, Irão, Iraque, Kuwait, Líbia, Nigéria e Venezuela.

As viaturas em serviço são quatro, três delas modelo *Solaris T18/Ganz* e uma *Solaris T18/Solaris*. Na figura (2.7) pode ser visto uma dessas viaturas em serviço.



Figura 2.7 – Viatura modelo *Solaris T18/Solaris* em serviço em Landskrona em linha em http://www.trolleymotion.ch/fileadmin/user_upload/documents/uitp/Anderson_Landskrona.pdf em 16.09.2013

2.3.1.2 - Kerch/Kertsch (Ucrânia) em 2004

A cidade de *Kerch/Kertsch* está situada na Ucrânia e tem uma população com cerca de 150 000 habitantes. O serviço de transportes públicos está a cargo da “*Kerch Municipal Production Enterprise*”. Nesta cidade, desde do ano de 2004, opera uma (1) linha de troleicarros com uma extensão de 6,6 km. As viaturas atualmente em serviço são dez, modelo *Yumz T2*, conforme se pode visualizar na figura (2.8). [21]



Figura 2.8 – Viatura modelo *Yumz T2* em serviço em Kerch/Kertsch, em linha em http://kerchrolleybus.com.ua/2010/12/01/gallery_2006/ em 16.09.2013

2.3.1.3 - Roma (Itália) em 2005

Nesta cidade habitam cerca de 2.500.000 habitantes. O serviço de transportes públicos é da responsabilidade da empresa “ATAC S.p.A”, que opera duas linhas de troleicarros, desde do ano de 2005 e que se podem visualizar na figura (2.9). [21]



Figura 2.9 – Viatura modelo *Solaris T18/Ganz* em serviço na Cidade de Roma em linha em http://www.trolley-motion.ch/index.php?id=115&L=0&n_ID=1528 em 23.09.2013

As viaturas em serviço neste momento são trinta, do modelo *Solaris T18/Ganz*, (figura 2.10), estando neste momento a ser ultimada uma entrega de mais quarenta e cinco novas unidades, modelo *BredaMenarinibus*. Na figura (2.10) pode-se ver uma destas viaturas em testes. [21]



Figura 2.10 – Viatura modelo *BredaMenarinibus* em teste na Cidade de Roma em linha em http://www.trolley-motion.ch/index.php?id=115&L=0&n_ID=1260 em 23.09.2013

Estas novas viaturas vão servir uma nova linha situada a sul desta cidade, estando prevista a sua abertura em meados do ano de 2013. [21]

2.3.1.4 Castellón (Espanha) em 2008

Castellón é uma cidade com cerca de 170 000 habitantes. Nesta cidade o serviço de transportes públicos é operado pelo “*Ayuntamiento de Castellón*”.

A linha T1 (TRAM1), desde o ano de 2008, é efetuada com recurso a três viaturas tipo troleicarro, modelo *Cristalis/CIVIS*, conforme a figura (2.11) mostra. [21]



Figura 2.11 – Viatura modelo Cristalis/CIVIS em serviço em linha em http://www.trolleyemotion.ch/index.php?id=115&L=0&n_ID=663 em 23.09.2013

O percurso da linha tem cerca de 2 km e é constituído por oito paragens. O serviço oferecido é efetuado em canal dedicado e exclusivo ao tráfego do troleicarro, estando neste momento em estudo o prolongamento desta linha em cerca de 400 m e a abertura de uma segunda linha. [21]

2.3.1.5-Lecce (Itália) em 2012

A cidade de Lecce tem uma população de cerca de 90 000 habitantes. O serviço de transportes públicos da cidade está a cargo da “*Società Gestione Multipla S.p.A*”. A linha nº 29 é efetuada com recurso a viaturas troleicarro desde o ano de 2012, sendo o percurso de cerca de 5 km. A frequência entre viaturas neste percurso é de 15 minutos, demorando este a ser percorrido em cerca de 45 minutos. [21]

As viaturas em serviço são quatro da marca *VanHool/Vossloh-Kiepe* (figura 2.12) encontrando-se neste momento a implementação de duas novas linhas, onde se espera que o número de troleicarros em serviço seja elevado para doze unidades. [21]



Figura 2.12 – Viatura VanHool/Vossloh- Kiepe, em linha em http://www.trolleyemotion.ch/index.php?id=115&L=0&n_ID=1627 em 23.09.2013

A aposta em viaturas troleicarro não se fica apenas cingida à implementação de novas linhas. Em linhas existentes, os seus operadores têm nesta última década, apostado em investir sobretudo em novas viaturas, mais eficientes, estando estas dotadas com a possibilidade de regeneração de energia para a rede de tração, baixando desde logo o seu consumo energético por km, de uma forma muito significativa, podendo chegar esta redução a valores muito próximos dos 25% a 30%. [5] [20] [21] [24]

2.3.2 Material Circulante

Para além das cidades que apostaram na introdução do transporte público com recurso a viaturas troleicarro, verifica-se que paralelamente noutras onde estes sistemas já estão implementados um forte investimento no que diz respeito a novas viaturas.

A procura de melhoria na eficiência energética leva à substituição de viaturas com tecnologias de controlo antigas e energeticamente ineficientes, por outras mais modernas e com maior eficiência energética, refletindo uma preocupação que os operadores de transportes dessas cidades têm com a sustentabilidade ambiental.

Desde o ano de 2000 e até ao final do ano de 2012, foram produzidas em todo o mundo mais de 8 500 viaturas troleicarro novas e estão encomendadas até 2017, mais de 650 novas viaturas.

Os maiores clientes são sem dúvida os países Europeus. Só a Europa, excetuando a Rússia, viu ser incorporado em linhas de tróleys, desde 2000 e até ao final de 2012, mais de 4 000 novas unidades e em termos de encomendas até 2017, estas chegam já a 353 novas unidades.[25]

O construtor com mais encomendas são a *ŠKODA TRANSPORTATION a.s* com cerca de 30,59% de encomendas correspondendo a 108 viaturas, seguido da *Solaris Bus & Coach S.A*, com cerca de 27,2% de viaturas encomendadas correspondendo a um total de 96 viaturas. As empresas *Carrosserie HESS AG.*, *Iribus - Iveco S.p.A.* e *Van Hool NV*, são responsáveis pelo fornecimento das restantes viaturas correspondendo respetivamente a uma percentagem de 17,28% (61 unidades), 15,58% (55 unidades) e 9,35% (33 unidades). [25]

Analisando a figura (2.13), ilustrativa de um estudo sobre a evolução dos valores unitários de aquisição de viaturas troleicarro (standard e articulados), revela que em média estes desceram cerca de 11% para troleicarros standard e 12% para troleicarros articulados, entre os anos de 2000 a 2005. [22]

Estes dados são representativos do dinamismo e do interesse que este mercado representa quer para as empresas construtoras e dos seus fornecedores (motores elétricos, sistemas eletrónicos de controlo, baterias e motores térmicos para marcha alternativa), quer para as empresas responsáveis pelos respetivos transportes urbanos, que veem assim o valor unitário das viaturas descer face ao aumento da procura destes veículos.

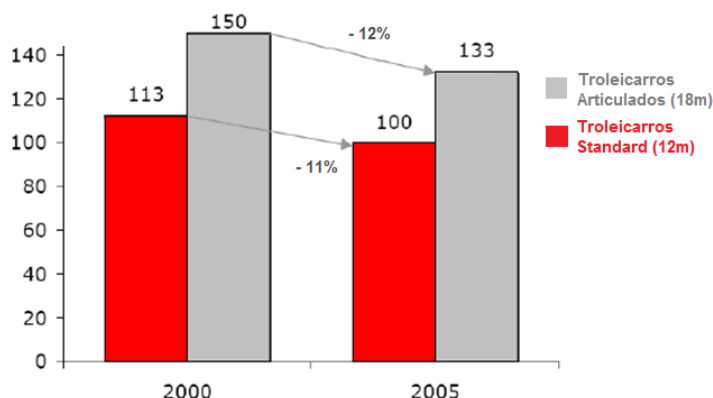


Figura 2.13 – Comparação de preços entre 2000 e 2006 de troleiros novos standard e articulados em linha em

http://www.trolley-motion.ch/fileadmin/user_upload/documents/Trolleybuses_eurobus_2006.pdf em 16.09.2013 - (tratado pelo autor)

2.4. Sistemas de Retificação e de Conversão AC-DC

O transporte e distribuição de energia elétrica são efetuados em Portugal em corrente alternada, seja ela efetuada pela Rede Elétrica Nacional com tensões de 60, 150, 220 ou 400 kV (transporte em alta tensão), ou pelas redes de distribuição, neste caso com tensões de 15 e 30 kV (distribuição em média tensão).

A distribuição de energia assente neste modelo apresenta algumas e significativas vantagens [26]:

- a) O transporte de energia para longas distâncias, sob a forma de corrente alternada, é mais económico por meio de sistemas trifásicos do que com qualquer outro número de fases;
- b) Os componentes dos sistemas trifásicos, nomeadamente os transformadores, são de construção simples, económicas e fiáveis quando em serviço;
- c) Sob certas condições, incluindo uma carga equilibrada nas fases, a potência instantânea do sistema mantém-se inalterável durante um período de onda;

Um outro aspeto importante na distribuição de energia em corrente alternada é a facilidade de se adaptar, por meio de transformadores, o nível de tensão pretendido. Este aspeto contribuiu fortemente para a adoção deste sistema ao nível da distribuição de energia. Contudo em algumas situações mais específicas, é necessário que as alimentações de cargas de alguns consumidores sejam efetuadas em corrente contínua, como é o caso das Redes de Tração. [3]

Esta conversão de corrente alternada em corrente contínua é levada a cabo por equipamentos específicos que se denominam por retificadores/conversores AC-DC.

Estes equipamentos podem ser classificados de acordo com:

- Número de fases que o alimenta (monofásico, trifásico, hexafásico, etc...);
- Em função da topologia (tipo de conexão dos seus constituintes, meia ponte ou ponte completa);
- A sua capacidade de ajustar o valor da sua tensão de saída (controlados e não controlados);

O equilíbrio das redes de distribuição a montante é um ponto essencial na exploração destas. Assim, nas aplicações, em que a carga representa um valor já assinalável, em termos de potência, que se pode referenciar a partir das dezenas de kVA, em regra, são utilizados sistemas de retificação trifásicos, que leva a uma distribuição simétrica da carga pelas três fases evitando-se assim desequilíbrios.

Por outro lado, constata-se também que os sistemas de retificação hexafásicos não são de utilização muito habitual, pelo facto dos transformadores que os alimentam terem um preço muito elevado, face ao equipamento trifásico com a mesma potência. [27].

No que concerne à topologia em meia ponte, verifica-se que esta não é utilizada, em particular onde possam coexistir elementos magnéticos tais como; os núcleos dos transformadores e indutâncias. Esta situação ocorre, porque neste tipo de ligação a corrente média de entrada apresentar um valor médio diferente de zero, contemplando deste modo uma componente contínua conforme se ilustra na figura (2.14).

A existência desta componente leva a sobreaquecimento e consequente aumento de perdas por efeito de Joule, que pode levar estes equipamentos à sua saturação, bem como à erosão eletrolítica, traduzindo-se numa desvantagem na utilização destes equipamentos. [28]

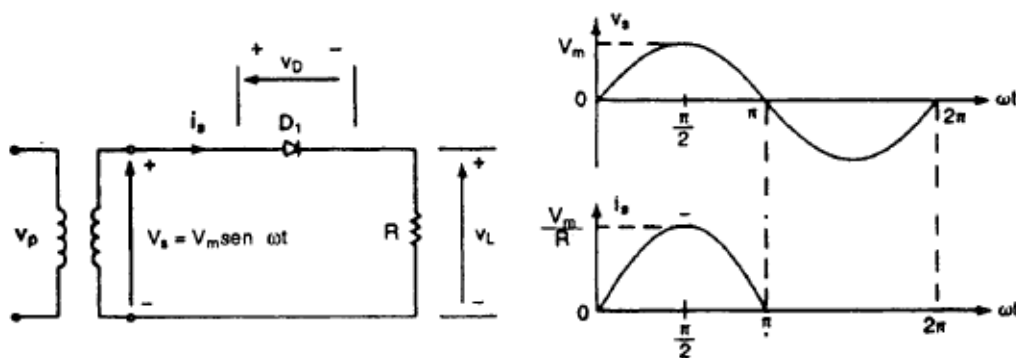


Figura 2.14 – Retificador de meia-onda (com carga resistiva) e formas de onda [29] - (tratado pelo autor).

Esta situação já não acontece com as topologias em ponte que por absorverem da rede uma corrente média nula os elementos magnéticos não são afetados, conforme a figura (2.15) ilustra [29].

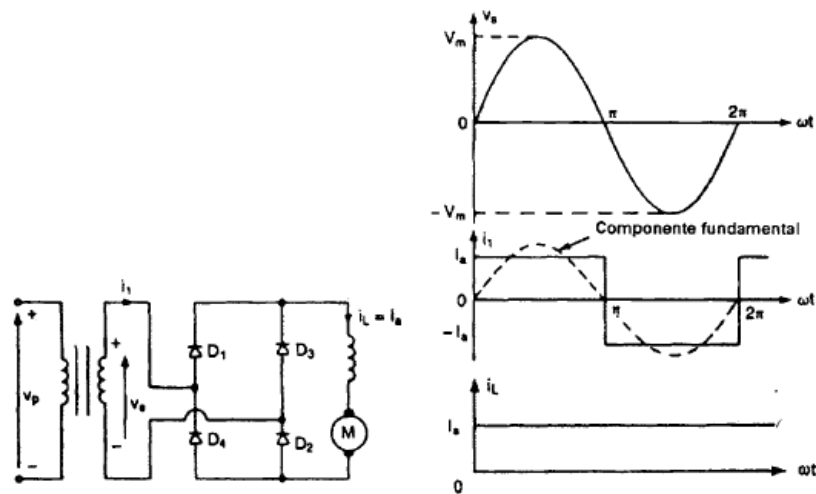


Figura 2.15 – Retificador de onda-completa (com carga indutiva) e formas de onda [29] - (tratado pelo autor)

Quando é pretendido um sistema de retificação cuja tensão na carga se pretende ajustar, ou controlar, são utilizados sistemas de retificação controlados. Estes sistemas têm uma ampla aplicação em sistemas industriais, especialmente em acionamento de velocidade variável. [29]

Os sistemas de retificação controlados utilizam elementos de retificação que permitem ser controlados, como por exemplo, tirístores em vez dos elementos de retificação a diodos que não têm esta possibilidade, conforme veremos na secção 2.4.1.

Um outro aspeto importante a ter em conta na utilização de retificadores/conversores AC-DC é o tipo de aplicação do sistema. As redes de tração são caracterizadas por terem significativas variações no consumo da carga que alimentam, que são nada mais nada menos que os veículos elétricos com as suas características particulares de serviço. Estas consistem basicamente em momentos de aceleração, no momento de arranque é onde se verificam consumos mais elevados e superiores ao consumo nominal dos motores de tração, e outros momentos, estes de desaceleração ou de travagem.

Este tipo de operações (aceleração, travagem) obriga a que o sistema de retificação/conversão, onde se inclui o transformador de potência, esteja preparado para suportar estas variações bruscas de cargas que se vão traduzir em esforços eletrodinâmicos e consequentemente térmicos que se fazem sentir nos equipamentos.

Neste sentido, os equipamentos de transformação, retificação/conversão a instalar devem obedecer ao tipo de aplicações para os quais são requeridos. A este nível as legislações aplicadas e que lhe dão suporte são a Norma Europeia EN 50328 e Norma da *International Electrotechnical Commission* IEC 60146-1-1.

Neste documento e consoante o objetivo da aplicação da rede de tração é definido o ciclo de sobrecarga, onde os respetivos regimes de funcionamento são caracterizados, por ordem

crescente e consoante a severidade definida na norma, conforme se pode verificar na tabela (2.2).

Tabela 2.2 – Ciclos de sobrecarga standard de acordo com a EN 50328 e IEC 60146 – 1-1

Ciclo de Sobrecargas	Regime de Sobrecarga (em relação a I_n com $I_n=1,0$ p.u)	Aplicações Típicas (alguns exemplos)
I	a) 1,0 p.u. em regime contínuo	Conversores de frequência para Sistemas ferroviários
II	a) 1,0 p.u. regime contínuo b) 1,5 p.u durante 1 min – após situação a)	-
III	a) 1,0 p.u. regime contínuo b) 1,5 p.u. durante 2 min. – após situação a) c) 2 p.u. durante 10 seg. – após situação a)	-
IV	a) 1,0 p.u. regime contínuo b) 1,25 p.u. durante 2 horas – após situação a) c) 2 p.u. durante 10 seg. – após situação a)	-
V	a) 1,0 p.u. regime contínuo b) 1,5 p.u. durante 2 horas – após situação a) c) 2 p.u. durante 1 minuto – após situação a)	Sistemas de Troleicarros
VI	a) 1,0 p.u. regime contínuo b) 1,5 p.u. durante 2h – após situação a) c) 3,0 p.u. durante 1 minuto – após situação a)	Sistemas ferroviários Sistemas do tipo Metros Ligeiro

No que concerne a uma rede de tração baseada num sistema de troleicarros, o ciclo de sobrecarga típico a considerar para efeito de dimensionamento dos equipamentos será ciclo de sobrecarga V.

Neste ciclo é considerado o seguinte regime de sobrecarga;

- a) 1,0 p.u regime contínuo
- b) 1,5 p.u durante 2 horas – após ocorrência situação descrita em a)
- c) 2 p.u durante 1 minuto – após ocorrência situação descrita em a)

2.4.1. Retificadores/Conversores trifásicos AC-DC

Conforme já referenciado, os retificadores/conversores AC-DC, são os mais utilizados quando se pretende alimentar cargas, que deles dependem para funcionarem.

Quando a rede de distribuição de baixa tensão quer seja monofásica, quer seja trifásica, não têm disponibilidade para alimentar as cargas dos clientes, essa alimentação é garantida por parte das empresas de distribuição de energia a partir da rede de distribuição em média tensão, que alimenta os postos de transformação instalados nesses locais. Estes postos de transformação alimentam por sua vez os retificadores/conversores trifásicos AC-DC aí existentes.

Podemos definir os retificadores/conversores trifásicos AC-DC em relação ao controlo dos interruptores de potência (semicondutores), do seguinte modo: [29]

- Retificadores não controlados, (doravante denominados como retificadores) quando estes são constituídos por díodos, que não permitem serem controlados;
- Retificadores controlados (doravante denominados como conversores AC-DC), quando estes são constituídos por tirístores, IGBT's, por exemplo;

A utilização de retificadores é efetuada quando se pretende que a tensão na carga, mais concretamente no barramento DC que as alimenta, tenha um valor constante e assim se mantenha durante todo o período de funcionamento das mesmas.

É neste contexto que as redes de tração se inserem, pois não há necessidade de fazer variar constantemente o valor da tensão no barramento DC e por conseguinte na carga.

Para pontuais variações ou “acertos” de tensão que possam advir da tensão distribuída por parte do fornecedor de energia, é usual acoplar ao equipamento de retificação não controlado um transformador equipado com tomadas de carga, que ajustam a tensão do seu secundário e assim garantem, no barramento de corrente contínua, o nível de tensão preconizado para o funcionamento dessa rede. Esta solução revela-se economicamente mais vantajosa do que utilizar os conversores AC-DC.

Os conversores AC-DC, por sua vez, são utilizados em situações onde se verifica a necessidade constante da variação de tensão na carga decorrentes da necessidade de funcionamento da carga, desde um valor de zero até um valor de tensão máxima.

Esta situação pode ser efetuada com recurso a um sinal de disparo ou ignição que obriga os interruptores de potência (semicondutores), tais como os tirístores, a passar do estado de bloqueio para o estado de condução. Esta ação vai “controlar” o ângulo de fase em que este começa a conduzir, variando deste modo o valor da tensão na carga. [29]

Em comparação com os retificadores, os conversores AC-DC, equipados com interruptores de potência do tipo tirístores, apresentam um fator de potência, a baixas cargas, tipicamente mais baixo, levando deste modo a que a corrente aparente seja elevada e as correntes harmónicas em valores absolutos sejam maiores do que as de um retificador. [28] [29] [30]

Atualmente existem outro tipo de conversores AC-DC que são constituídos com outros tipos de interruptores de potência, que para além de serem controlados tal como os tirístores, permitem também a bidireccionalidade⁷ habilitando o funcionamento em modo de regeneração de energia para além do controlo do fator de potência e da tensão da carga.

⁷ Os *Conversores AC-DC* duais são dois conversores equipados com tirístores conectados em antiparalelo, podem também operar em quatro quadrantes com a consequente possibilidade regeneração de energia. Em termos comerciais para redes de tração os equipamentos encontrados para comercialização são *Conversores AC-DC* equipados com IGBT's, com a implementação de um díodo em anti-paralelo.

Este tipo de conversores está equipado com interruptores de potência (semicondutores) controlados, IGBT's ou GTO's, entre outros. Estes sistemas têm um custo superior em média de 2,5 vezes mais do que um retificador para a mesma potência. [29]

No caso das redes de tração, onde este tipo de conversores possa existir, estes coexistem em paralelo com retificadores, ou seja num dos “ramos” é feita a retificação, instalando-se para o efeito um grupo transformador-retificador, interligando deste modo a média tensão ao barramento DC e no outro ramo é instalado um grupo transformador-conversor AC-DC, interligando este à média tensão da rede, permitindo deste modo que energia gerada pelas viaturas em modo regenerativo e que chega ao barramento DC possa fluir para a rede de distribuição.

O investimento nesta solução tem contudo custos de investimento extremamente altos, sendo que existem outras soluções menos onerosas para aproveitamento da energia regenerativa.

Uma outra solução que atualmente começa a aparecer nestes sistemas é o armazenamento desta energia no sistema de tração (viatura ou na rede de tração) com essa capacidade e que posteriormente é recuperada quando a situação de consumo o exija. Neste contexto em situações de necessidade de acompanhar o aumento do consumo requerido pela rede de tração, a energia armazenada é libertada para fazer face a este pico de consumo. Estes sistemas estão ainda numa fase inicial de implementação com um custo de instalação elevado.

Contudo, tanto uma como outra solução, requerem um número elevado de viaturas com capacidade de regeneração de energia, para que se possam tornar, quer uma quer outra, economicamente vantajosas.

2.4.2. Topologias de Retificadores/Conversores trifásicos AC-DC

Os retificadores/conversores trifásicos AC-DC mais utilizados são os trifásicos em ponte completa. Este sistema é amplamente utilizado em aplicações de potência e são caracterizados por terem uma ondulação, na carga, de seis pulsos, daí serem também chamados retificadores/conversores de 6 pulsos.

No caso de um retificador deste tipo, conforme figura 2.17, os díodos são numerados na ordem da sua sequência de condução, e cada um conduz por 120° . A respetiva sequência de condução de cada par de díodos é 1-2, 2-3, 3-4, 4-5, 5-6 e 6-1. [29]

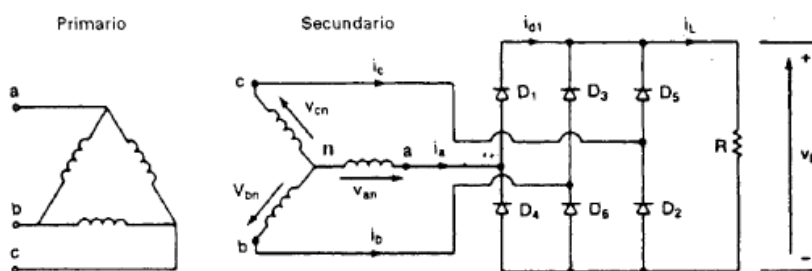


Figura 2.16 – Retificador trifásico em ponte completa (6 pulsos) com carga resistiva [29]

A condução de cada par de díodos, dá-se quando a tensão das fases de alimentação aos terminais destes tiver a maior tensão instantânea. A tensão entre fases, ou seja, a tensão composta é $\sqrt{3}$ vezes a tensão de fase de uma fonte trifásica ligada em Y (estrela).

O aumento do número de pulsos pode ser efetuado, com relativa facilidade com a associação de retificadores ou conversores. Esta associação pode ser como combinação entre dois retificadores/conversores AC-DC de 6 pulsos, denominando-se de retificadores ou conversores de 12 pulsos ou por associação entre dois retificadores/conversores AC-DC de 12 pulsos, denominando-se este último de 24 pulsos.

A associação destes equipamentos pode ser tanto em série, como em paralelo, conforme se indica na secção 2.4.3.

A diferença entre instalar equipamento de retificação de 6, 12 ou 24 pulsos é refletida ao nível das componentes harmónicas injetadas na rede, isto é com o aumento do número de pulsos de retificação, menores serão os valores das componentes harmónicas injetadas, aumentando consequentemente o valor do investimento a efetuar. [28]

A título exemplificativo, se o investimento num sistema de retificação não controlado de 6 pulsos for de C_i , este duplicará ($2 \times C_i$) em comparação com um equipamento de 12 pulsos e triplicará ($3 \times C_i$) em comparação com um equipamento de 24 pulsos. [28]

Estes dados são suportados pela necessidade de instalação no caso de um retificador de 12 pulsos, de um transformador de duplo secundário levando neste caso à duplicação do número de díodos do retificador e no caso de um retificador de 24 pulsos, à necessidade de instalação de dois transformadores de duplo secundário levando à quadruplicação do número de díodos. [28]

Os esquemas de ligação destes equipamentos podem ser visualizados nas figuras (2.17) a (2.19):

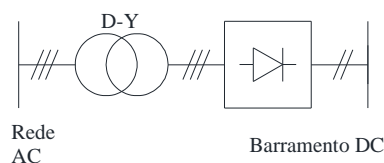


Figura 2.17 – Ligação esquemática de um retificador de 6 pulsos

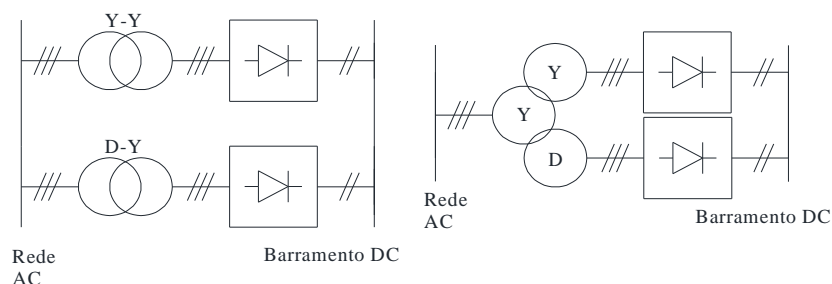


Figura 2.18 – Ligações esquemática de um retificador de 12 pulsos

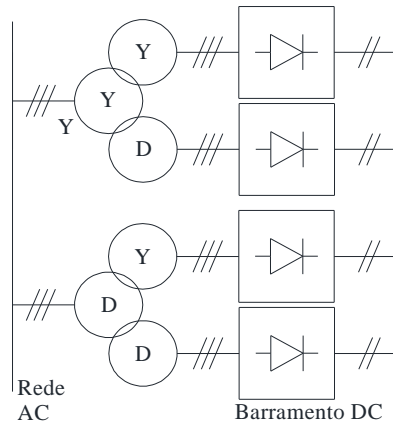


Figura 2.19 – Ligação esquemática de um retificador de 24 pulsos

2.4.3 Associação de Retificadores/Conversores AC-DC

Existem algumas situações que para o conveniente funcionamento do sistema é necessário proceder à associação de retificadores/conversores, quer sejam eles controlados ou não controlados. [29]

As associações de retificadores/conversores são efetuadas essencialmente em três situações:

- Associação em série – normalmente utilizada nas situações em que se deseja uma tensão contínua na carga (V_{dc}), de valor elevado, que por diversas situações não poderia ser obtida por um único Retificadores/Conversores,
- Associação em paralelo – normalmente utilizada quando a carga exige uma corrente que por qualquer motivo não pode ser fornecida por um único retificador,
- Redução do conteúdo harmónico – é utilizada tanto a associação série ou a paralelo, quando o objetivo é reduzir o conteúdo harmónico da corrente de carga.

Essas associações podem ser visualizadas na figura (2.20).

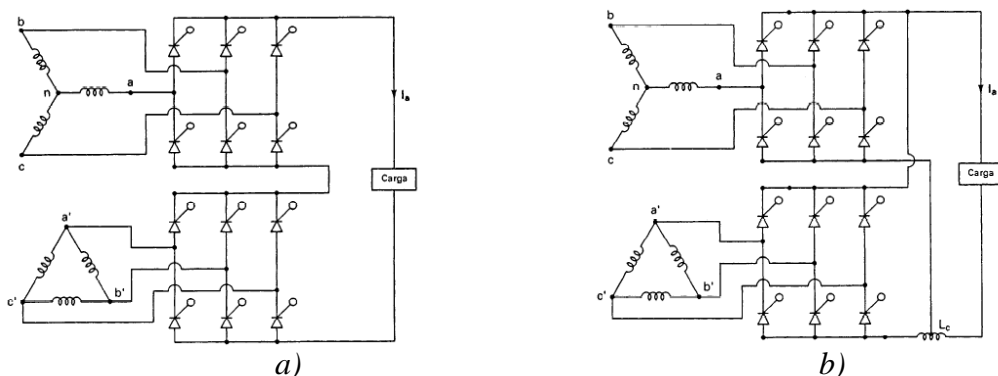


Figura 2.20 – a) Retificador/conversor controlado de 12 pulsos em associação série [29]

b) Retificador/conversor controlado de 12 pulsos em associação paralelo [29]

Verifica-se que em ambos os circuitos, as tensões de entrada de cada um dos retificadores/conversores AC-DC têm o mesmo valor eficaz, mas com desfasamentos de 30°, entre os sistemas trifásicos de cada uma das pontes retificadoras. [29]

Neste tipo de retificadores/conversores, o espectro harmónico mostra que só existem harmónicas em frequências de ordem de $pk \pm 1$, ou seja após a fundamental, em que p , representa o número de pulsos do retificador, conforme se verá mais detalhadamente na secção 2.4.5. [29] [30]

2.4.4 Poluição Harmónica

A utilização de cargas eléctricas não lineares, quer sejam passivas ou por intermédio de conversores de potência, provoca a injeção na rede de correntes “parasitas”, acarretando deste modo distorções de tensão na alimentação das redes de distribuição de energia eléctrica.

Esta situação pode ser particularmente perigosa e nefasta nas instalações situadas na vizinhança, se a soma das correntes harmónicas for superior a certos limites. [27] [28] [30].

Na sua maioria, as cargas não lineares, são conversores eletrónicos de potência que permitem adaptar a fonte de energia (rede de alimentação, baterias, etc..), às necessidades da carga. Neste aspeto convém ainda realçar que também os transformadores saturados, comportam-se como cargas não lineares, contribuindo deste modo para esta problemática. [28] [30].

A distorção das formas de onda, quer da corrente quer da tensão (que representa o afastamento em relação a uma onda sinusoidal perfeita), pode ser efetuada através do desenvolvimento em séries de Fourier. [27] [30].

Este desenvolvimento decompõe estas formas de onda num somatório de tensões ou correntes sinusoidais com frequências múltiplas da fundamental.

- *Decomposição em série de Fourier*

Um sinal $f(t)$, período T (frequência $f=1/T$) e com uma pulsação $\omega_1=2\pi \cdot f$, independentemente de ser uma corrente ou tensão que pode ser decomposta do seguinte modo: [40]

$$f(t) = c_0 + \sum_{h=1}^{\infty} c_h \sin(h\omega_1 + \phi_h), \quad (2.1)$$

com h inteiro positivo ($h=1,2,3,4,\dots$) e sendo:

$$c_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) \cdot dt, \quad (2.2)$$

o valor médio do sinal $f(t)$. As frequências $h\omega_1$, são denominadas como frequências harmônicas de ordem h , onde para $h=1$, representa a componente fundamental. Os termos c_h correspondem às amplitudes das componentes harmônicas de ordem h , sendo ϕ_h os respectivos ângulos de fase, obtidos por : [30]

$$c_h = \sqrt{a_h^2 + b_h^2} \text{ e } \phi_h = \tan^{-1} \frac{a_h}{b_h} \text{ com } \begin{cases} a_h = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(h\omega_1 t) \cdot dt \\ b_h = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(h\omega_1 t) \cdot dt \end{cases}. \quad (2.3)$$

- *O valor eficaz*

Uma forma de descrever um dado sinal, é proceder à avaliação do seu valor eficaz.

O valor eficaz do sinal $f(t)$, é dado por: [30].

$$f_{\text{eficaz}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T f(t)^2 \cdot dt} \quad (2.4)$$

E uma vez que um sinal distorcido leva em conta todas as componentes do sinal obtido pelo desenvolvimento em série de Fourier, temos então:

$$f_{\text{eficaz}} = \sqrt{c_0^2 + \sum_{h=1}^{\infty} c_h^2} \quad (2.5)$$

Deste modo, quando para além da fundamental um sinal possui componentes harmônicas, o valor eficaz desse sinal é diferente do eficaz valor do fundamental. Isto permite numa primeira análise avaliar a distorção harmónica de um dado sinal por comparação do seu valor eficaz da sua componente fundamental com o seu valor eficaz total.

2.4.4.1 Tipos de Distorção Harmónica mais usuais em Sistemas de Retificação

Nos sistemas de retificação os tipos de distorção de formas de onda mais usuais são: [29] [30]

- *Componente DC*, que resulta da presença num sistema de alimentação AC de uma tensão ou corrente DC. Este fenómeno pode ser resultado do efeito de retificação de meia onda;
- *Harmónicos*, são tensões ou correntes sinusoidais com frequências múltiplas inteiras da frequência fundamental, sendo comum caracterizar o nível harmónico de um sistema através de uma única quantidade, a Distorção Harmónica Total, que caracteriza o valor efetivo da distorção harmónica presente num sistema eléctrico.

É comum distinguir-se dois tipos de grandezas:

i) *Distorção Harmónica da Corrente (THD_i)*,

$$THD_i = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \left(\frac{I_{c_h}}{I_{c_1}} \right)^2} \quad (2.6)$$

onde I_{c_h} é o valor eficaz da harmónica de ordem h da corrente e o I_{c_1} o valor fundamental. Depende somente dos valores eficazes da corrente de carga.

ii) *Distorção Harmónica da Tensão (THD_v)*

$$THD_v = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \left(\frac{V_{c_h}}{V_{c_1}} \right)^2} \quad (2.7)$$

onde V_{c_h} é o valor eficaz da harmónica de ordem h da tensão e o V_{c_1} o seu valor fundamental. Contrariamente à distorção harmónica de corrente, a distorção harmónica de tensão é função das correntes harmónicas caracterizadas pela carga e da impedância de curto-circuito da rede.

A equação (2.7) pode ser reescrita como:

$$THD_v = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \left(\frac{|Z_{sc}^h| I_{c_h}}{V_{c_1}} \right)^2} \quad (2.8)$$

sendo, o $|Z_{sc}^h|$ o módulo da impedância de curto-circuito para a harmónica de ordem h .

Neste sentido, verifica-se que quanto mais baixo for o valor da impedância, mais baixo é a distorção em tensão.

- *Sulcos de Comutação (notching)*; representam uma perturbação periódica da onda de tensão causada pelo funcionamento normal dos dispositivos de eletrónica de potência quando se processa no sistema a comutação de uma fase para a outra, como é o caso dos retificadores trifásicos.

2.4.5 Fontes de Distorção nos Retificadores/Conversores AC DC

A incidência da distorção harmónica, de uma forma geral tanto se manifesta na tensão como na corrente. A utilização de retificadores ou conversores AC-DC, leva a fenómenos perturbadores da qualidade da onda de tensão a montante, nomeadamente pela presença de sulcos na onda de tensão alternada. [28] [29] [30]

Este número de sulcos na tensão é igual ao índice de pulsação p , por período, sendo definido como o quociente entre o período das tensões alternadas à entrada do retificador/conversor e o período da tensão na sua saída. Para além disso a amplitude e a frequência das perturbações harmónicas, dependem da estrutura do retificador e do seu índice de pulsação p . [28] [30]

No caso teórico, onde a corrente de saída de um retificador trifásico é considerado como perfeitamente contínua, a frequência das correntes harmónicas à entrada do retificador tem um valor h vezes superior à frequência fundamental, onde a ordem é dada por: [28] [29] [30]

$$h = kp \pm 1 \quad (2.9)$$

onde $k=1,2,3\dots$ e p o índice de pulsação do respetivo retificadores/conversores (no caso de um *retificador/conversor* trifásico em ponte completa $p=6$).

O cálculo teórico da amplitude das correntes harmónicas é calculado pela seguinte equação: [28] [29]

$$I_h = \frac{I_1}{h} \quad (2.10)$$

Nas situações onde a indutância da rede L_s é relativamente baixa em relação à indutância da bobina colocada do barramento DC do retificador, as correntes absorvidas nas fases apresentam uma forma de onda aproximadamente retangular e desfasadas de 120° . [29] [28]

A figura (2.21) apresenta os valores eficazes das componentes harmónicas de ordem h da corrente absorvida que podem ser calculadas com recursos às expressões (2.09) e (2.10), para um retificador de 6 pulsos e 12 pulsos.

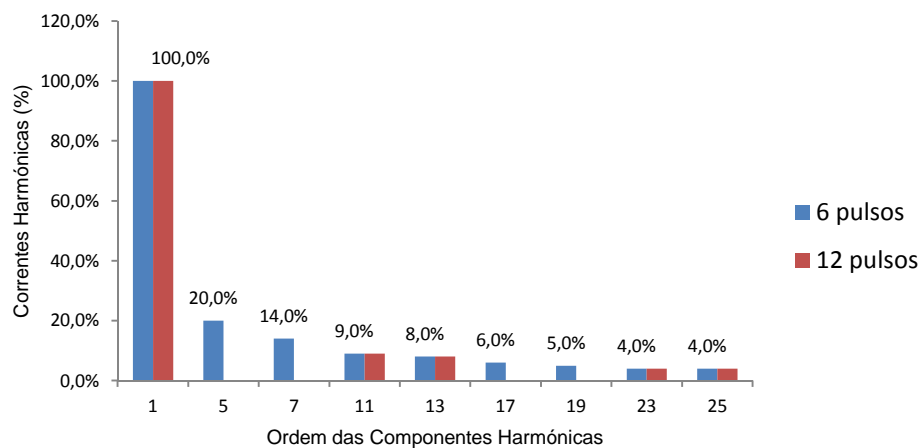


Figura 2.21 – Espectro harmónico teórico da corrente absorvida por retificadores trifásicos de 6 e 12 pulsos

2.4.6 Efeitos da Distorção Harmónica

Os efeitos da distorção harmónica, traduzem-se pelo aumento dos valores de pico das grandezas do sistema, levando ao conseqüente aumento quer dos seus valores eficazes do espectro harmónico das frequências quer das tensões e das correntes.

As conseqüências mais importantes desta problemática nos equipamentos, na rede e nas cargas, são os seguintes [27] [28] [29] [30]:

Envelhecimento prematuro do isolamento, que pode levar à sua rutura;

- Aumento das perdas por efeito de Joule nos motores, transformadores e cabos;
- Vibrações e desgaste mecânico;
- Mau funcionamento de equipamento eletrónico sensível;
- Erros de leituras dos equipamentos de medidas;

Neste contexto, a poluição harmónica apresenta efeitos nefastos para os equipamentos e cargas existentes na instalação eléctrica, onde estão inseridos, tornando-se necessário e fundamental manter os níveis desta poluição dentro de limites estabelecidos por normas sendo fundamental implementar medidas que visem a sua diminuição. [28]

2.4.7 Normas Nacionais e Internacionais

Conforme vimos na secção anterior, os efeitos produzidos pela distorção harmónica traduzem-se em graves consequências quer nos equipamentos quer nas instalações.

Para fazer face a esta problemática, existem um conjunto de normas que resultam de recomendações, diretrizes e limites, que seguidas têm como objetivo precisamente a diminuição da poluição harmónica por um lado e por outro assegurar a compatibilidade entre os equipamentos e sistemas onde estão inseridos. [30]

As normas aplicáveis são:

- Ao nível internacional, as normas 1000 da autoria da *International Electrotechnical Commission* (IEC) que definem os níveis de correntes e tensões harmónicas que não devem ser ultrapassados.

Neste particular e para equipamentos com correntes superiores a 16 A, a norma IEC recomenda a aplicação da IEC 61000-3-4.

- Ao nível europeu, a norma aplicável é a EN 50 160, que fornece as principais características da tensão e tensões harmónicas no ponto de entrega ao consumidor em baixa e média tensão, em condições normais de operação.

Para além destas, existe ainda a norma americana de referência nesta matéria, apresentada pelo IEEE na recomendação 519-1992 "*IEEE Recommended Practices na Requirements for Harmonic Control in Electtical Power Systems*". Esta recomendação foi proposta inicialmente em 1981 tendo sido revista em 1992. Tem como objetivo recomendar valores limites sobre conteúdo harmónico de acordo com os seguintes critérios [31]:

- Limite na quantidade de correntes harmónicas que um consumidor final pode injetar na rede de distribuição do distribuidor de energia eléctrica;
- Limite no nível de distorção harmónica das tensões que o distribuidor de energia pode fornecer ao consumidor.

Estes limites, são dependentes do ponto de interligação (*PCC –Point of Common Coupling*), corrente de curto-circuito desse local (I_{SC}), a corrente máxima absolvida pela carga num período de 15 ou 30 minutos (I_L) e a distorção total (*TDD –Total Demand Distortion*), sendo esta idêntica ao THD, com a consequente substituição da corrente fundamental I_1 por I_L . [30] [31]

O importante para esta recomendação é o que é refletido para o exterior, ou seja, para os restantes consumidores ligados à mesma rede de alimentação. Contudo, esta norma define

diretrizes para os níveis harmónicos da corrente e a distorção da tensão em relação às linhas de transmissão, distribuição e o PCC com os consumidores.

No nosso país e desde 1995, foi adaptada a norma europeia EN 50160, com a sua redação portuguesa cuja indicação relativamente à problemática dos limites ao nível do teor harmónico das correntes é omissa, tal como na sua versão original.

Neste sentido, constata-se que existe uma necessidade de controlar estes níveis para que a degeneração dos índices de qualidade da onda de tensão seja minimizada.

Pela análise da normalização chegamos à conclusão que esta deveria recomendar ou até impor os limites máximos admissíveis, bem como estabelecer valores máximos de correntes harmónicas para evitar que o conteúdo harmónico seja excedido no ponto de entrega de energia.

2.5. Conclusões

Neste capítulo é abordado de uma forma sucinta o estado da arte das viaturas troleicarro e da evolução dos seus sistemas onde se apresentam também algumas tendências atuais sobre algumas topologias de montagens, sempre com o objetivo final de se chegar a viaturas, sob o ponto de vista energético, as mais eficientes possíveis.

No que diz respeito aos sistemas de troleicarros existentes, constata-se cerca de 40 000 veículos em operação, um número verdadeiramente impressionante e que faz pensar que este tipo de mobilidade urbana é uma alternativa perfeitamente viável aos autocarros convencionais a gásóleo.

Um outro aspeto importante é da aposta neste tipo de veículos em novas linhas, incluindo até em países onde não havia tradição na implementação deste tipo de viaturas. A provar isso está o fato de estes sistemas estarem a ser instalados em cidades de países produtores de petróleo.

Pensar portanto, que este meio de mobilidade urbana é coisa do passado e ultrapassada, não atesta a realidade que se verifica. A entrada de cerca de 4 000 novos veículos troleicarro entre 2000 e 2012 e centenas que atualmente estão encomendados para os próximos anos é a prova disso mesmo.

O custo inicial na aquisição destas viaturas em comparação com viaturas a gásóleo é bastante superior, mas quando inseridos numa frota e geridos eficientemente está demonstrado que este diferencial dilui-se ao longo do tempo, uma vez que estas viaturas apresentam um tempo de vida útil muito superior aos autocarros convencionais a gásóleo.

Os sistemas de troleicarros são os sistemas que mais se adaptam a cidades consolidadas de média dimensão, em que a procura de transportes é suficientemente elevada e sustentada para viabilizar um sistema de transportes públicos urbanos. Disso é exemplo a cidade de Salzburgo

com cerca de 140 000 habitantes e Património Mundial da Unesco (em 1996) estando este sistema fortemente implantado.

Para além das viaturas troleicarros, são também apresentados sistemas de retificação ou conversão de corrente alternada em corrente contínua. Estes sistemas são amplamente utilizados em redes de tração em corrente contínua.

Dos sistemas existentes, os mais utilizados nas redes de tração, são os sistemas não controlados (de 6 pulsos), sobretudo em potências relativamente baixas, na ordem das centenas de quilowatts. Isto prende-se com duas questões. A primeira diz respeito à alimentação trifásica que leva a um equilíbrio no consumo, essencial para a estabilidade da rede de distribuição e a outra questão é que nesta ordem de potências a injeção de correntes harmónicas não ser significativa. Quando as componentes harmónicas se tornam relevantes, para potências na casa dos megawatts a opção passa então por instalar sistemas de 12 ou 24 pulsos. Este aumento do número de pulsos leva a menores valores das componentes harmónicas injetadas, aumentando por sua vez o valor do investimento a efetuar.

Em comparação com os conversores AC-DC, da mesma topologia, equipados com tirístores, os retificadores apresentam um fator de potência, a baixas cargas, tipicamente mais alto, o que se traduz numa vantagem destes últimos.

Quando os sistemas de tração e os equipamentos que dela fazem parte permitem a regeneração de energia, pode ser previsto a instalação em paralelo com o sistema de retificação, um sistema de conversores AC-DC permitindo deste modo o seu funcionamento bidirecional. Esta opção revela-se muito dispendiosa, porque para além da instalação de um sistema de retificação, obriga também à instalação de mais um transformador e um conversor AC-DC com estas características. Comercialmente esta solução é obtida com conversores AC-DC equipados com IGBT's.

Atualmente existem ainda sistemas, que apesar de ainda serem relativamente recentes permitem também o armazenamento da energia gerada pela regeneração de energia por parte das viaturas troleicarro (que tenham essa capacidade) em equipamentos ou sistemas, que posteriormente a liberta, para por exemplo fazer face a “picos no consumo”. Estes sistemas são ainda dispendiosos e estão numa fase inicial de desenvolvimento para aplicação comercial.

De qualquer modo, estas soluções poderão ser válidas quando existem em operação viaturas troleicarro que estão habilitadas a efetuar a regeneração de energia e em número muito superior a viaturas em serviço que não estejam habilitadas para o fazer. Tal não é o caso das viaturas troleicarro da cidade de Coimbra, onde a grande maioria da frota existente, não tem a capacidade de regeneração de energia. Neste contexto estas soluções não se revelam particularmente interessantes.

3. DESCRIÇÃO E ENQUADRAMENTO DO PROBLEMA

3.1. Introdução

Os Serviços Municipalizados de Transportes Urbanos de Coimbra (SMTUC) são os responsáveis pela gestão da rede de transportes urbanos na cidade de Coimbra.

Neste sentido, são uma estrutura municipal vocacionada para assegurar o serviço público de transporte rodoviário de passageiros no Concelho de Coimbra e por conseguinte responsável pela operação de uma frota, constituída por 138 viaturas, distribuídas por 106 autocarros (22 viaturas médias, 83 standard e 1 articulado), 14 viaturas troleicarro standard, 8 miniautocarros e 3 miniautocarros eléctricos. Para além destas viaturas, opera ainda 1 autocarro de turismo, 2 viaturas miniautocarro para aluguer e também 4 viaturas equipadas para transporte passageiros com mobilidade reduzida. [13]

No final do ano de 2013, exploravam 86 linhas, sendo 84 em autocarros e outras 2 através de viaturas troleicarro, numa extensão total de 556,2 km de rede viária e 24,7 km de rede aérea. Desta extensão de rede apenas são utilizados em serviço comercial (serviço de cheio) cerca de 17,15 km. [13]

Os SMTUC, têm ainda como missão “*garantir uma oferta de transporte público adequada às necessidades das populações desenvolvendo ações que privilegiem a opção do uso do transporte coletivo*”. [32]

O seu funcionamento assenta ainda nos seguintes objetivos estratégicos:

- Melhoria da eficiência e da qualidade de serviço;
- Prosseguir uma política de mobilidade sustentada;
- Aposta na atualização tecnológica, na informação e comunicação com o cliente;
- Promover políticas de desenvolvimento de “um transporte mais limpo e melhor”;
- Contenção de custos e fomento de boas práticas de gestão;
- Contribuir para maior fluidez e ordenamento do trânsito e do transporte público;
- Melhorar a articulação entre os diversos modos de transporte.

De acordo com os seus indicadores de atividade, evidenciados no seu Relatório de Gestão de 2012, foram transportados durante o ano de 2012 cerca de 14 843 000 passageiros. Destes, cerca de 623 000 foram transportados pelas viaturas troleicarro. [13]

Estes passageiros foram transportados pelas duas linhas de viaturas troleicarro que estão atualmente em serviço. Estas duas linhas, são denominadas:

- *Linha n° 4* (Estação Nova – Stº António dos Olivais, via *Celas*),
- *Linha n°103* (Estação Nova – Stº António dos Olivais, via *Universidade*).

Estas linhas são alimentadas por duas subestações retificadoras, a de Montarroio e a do Calhabé.

A subestação de Montarroio é a mais antiga e foi instalada nos finais dos anos 50 do século passado e é constituída por dois grupos transformador-retificador, utilizando para a retificação uma tecnologia baseada em ampolas de mercúrio.

A tecnologia da subestação do Calhabé é do último terço do século passado, bem mais recente e baseia-se no funcionamento de um grupo transformador-retificador trifásico de 6 pulsos, mais eficiente e de fácil manutenção do que a tecnologia da subestação de Montarroio.

A existência de mercúrio (líquido e vaporizado) no retificador na subestação de Montarroio é por si só um perigo para o ambiente e consequentemente para a saúde pública. Acresce ainda que, a contribuir negativamente para esta situação, está a localização desta subestação, uma vez que se encontra nas imediações de uma escola com algumas centenas de alunos. No caso de derrame de mercúrio, decorrente de uma avaria nos retificadores, a escola será um dos principais locais atingidos, com as consequências para a saúde que daí advirão.

Paralelamente à questão de melhoria da eficiência energética, com a diminuição dos GEE, a questão da saúde pública será tão ou mais importante do que estas. Os malefícios que agora se conhecem pela utilização do mercúrio levam à necessidade premente da substituição deste equipamento.

A caracterização das linhas, incluindo a sua orografia bem como a da localização das subestações, com a descrição dos seus equipamentos e dos respetivos perigos para a saúde serão os temas em desenvolvimento neste capítulo.

A terminar e não sendo contudo um problema, serão abordados ainda as características técnicas dos motores de tração de cada um dos tipos de viaturas troleicarro em serviço na cidade, o *Efacec/Salvador Caetano* e o *Skoda/Trolino Solaris*, nomeadamente no que diz respeito às correntes nominais e de arranque. Essas características são de importância vital para o dimensionamento dos novos equipamentos, em particular no que concerne à perfeita adaptação dos novos equipamentos candidatos à substituição das atuais subestações retificadoras.

3.2. Localização dos Equipamentos (Subestações e Rede Aérea)

Conforme já referido, a rede de tração dos Serviços Municipalizados de Transportes de Coimbra que se encontra atualmente em exploração comercial (serviço de cheio) cerca de 17,15 km, tem uma extensão total de aproximadamente 27,4 km, cujos trajetos e planimetrias, serão abordados mais à frente com maior pormenor.

A Rede de Tração é alimentada por duas Subestações de Retificação, uma situada na Rua de Montarroio e a outra junto ao Mercado do Calhabé. A Subestação do Calhabé é também conhecida por Subestação de S. José. A figura (3.1) mostra as suas localizações.

A potência total instalada é de 1 800 kW, com dois grupos retificadores de 600 kW na Subestação de Montarroio e um grupo retificador de 600 kW na Subestação do Calhabé.



Figura 3.1 – Localização das Subestações de Retificação - (tratado pelo autor)

3.3. Área de Influência de cada uma delas

A Rede de Tração dos Troleicarros na Cidade de Coimbra são de fato duas, ou seja existe uma parte da rede alimentada pela Subestação de Montarroio e outra, alimentada pela Subestação do Calhabé e que pode ser visualizada nas figuras (3.2) a (3.4).

As zonas de “fronteira” entre as duas redes estão situadas nos Arcos do Jardim, Avenida Dr. Dias da Silva (ao chegar junto da Rua Bernardo de Albuquerque) e Avenida Emídio Navarro (junto ao Hotel Astória - Portagem).

A ligação entre estas duas redes é efetuada através de seccionadores inseridos na rede aérea onde de um lado a rede é alimentada por uma subestação e do outro lado pela outra, garantindo deste modo o isolamento entre as duas alimentações.

Cada uma destas redes está ainda subdividida por troços mais pequenos, também estes separados por seccionadores. Estes seccionadores servem para garantir a segurança durante as manutenções e avarias, quando se verifica a intervenção por parte dos técnicos dos Serviços Municipalizados de Transportes Urbanos de Coimbra.

3.3.1 Rede Tração alimentada pela Subestação de Montarroio

A rede alimentada pela Subestação de Montarroio abrange a grande parte das duas linhas que se encontram atualmente em serviço, ou seja a *Linha nº4* e a *Linha nº 103*.

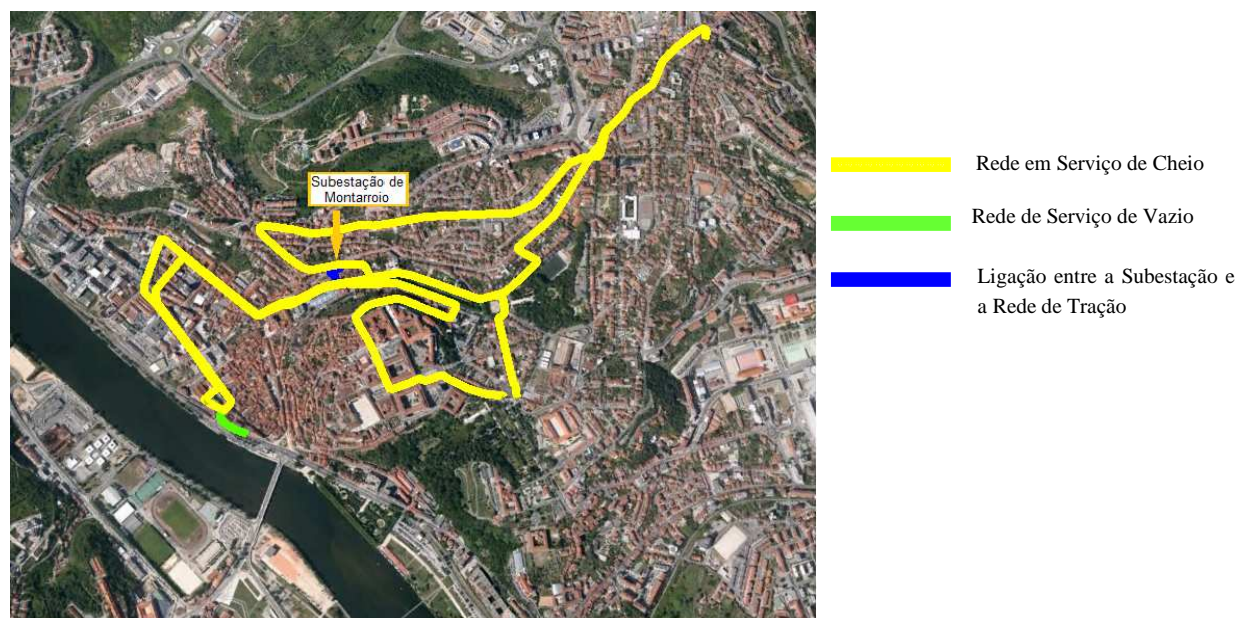


Figura 3.2 – Rede de Tração alimentada pela subestação de Montarroio - (tratado pelo autor)

No que diz respeito à *Linha nº 4*, a alimentação da *Rede de Serviço de Vazio*⁸, que se pode visualizar na figura (3.2), é residual, estando limitada a poucas centenas de metros. Esta seção de rede aérea encontra-se instalada entre a Rua António Granjo até cerca de algumas centenas de metros antes do final da Avenida Cidade Aeminum, sentido ponte de Santa Clara.

No sentido inverso, ou seja para o Arnado, desde Avenida Emídio Navarro (junto ao Hotel Astória) ao cruzamento entre a Rua António Granjo e a Avenida Fernão de Magalhães (sentido ascendente). Estas alimentações são também comuns à *Linha nº 103*.

A *Rede de Serviço em Cheio*, indicada a amarelo na figura (3.2), é alimentada por esta subestação, no sentido ascendente, na Rua António Granjo, Avenida Fernão de Magalhães Rua Dr. Manuel Rodrigues, Rua da Sofia, Rua Olimpo Nicolau Rui Fernandes, até ao início da Avenida Sá da Bandeira. Seguidamente inflete para a Rua da Manutenção Militar, Rua de Saragoça, Rua António José de Almeida, Cruz de Celas, Rua Bernardo de Albuquerque, e início da Avenida Dr. Dias da Silva.

No sentido descendente recomeça na Rotunda João Paulo II (junto aos Arcos do Jardim), Rua Alexandre Herculano, Praça da República, Avenida Sá da Bandeira, Rua Olimpo Nicolau Rui

⁸Denomina-se neste caso como *Rede de Serviço em Vazio*, a rede de tração que serve para a viatura troleicarro se deslocar entre a Estação Depósito da Guarda Inglesa e o início do percurso comercial. Nos percursos comerciais é denominada como *Rede de Serviço em Cheio*

Fernandes, Rua da Sofia, Rua João Machado, Avenida Fernão de Magalhães, até à Rua António Granjo.

No que concerne à *Linha nº 103*, a *Rede de Serviço em Cheio*, que se indica também a amarelo na figura (3.2), esta subestação alimenta a rede de tração, no sentido ascendente, instalada na Rua António Granjo, Avenida Fernão de Magalhães Rua Dr. Manuel Rodrigues, Rua da Sofia, Rua Olimpo Nicolau Rui Fernandes, Avenida Sá da Bandeira, Rua António Padre Vieira, Rua S. João, Rua Larga, Largo D. Dinis e Calçada Martim de Freitas, até aos Arcos do Jardim.

No sentido descendente, recomeça na Avenida Dr. Dias da Silva (nas imediações do Pavilhão dos Olivais), Rua Bernardo de Albuquerque, Cruz de Celas, Rua Augusta, Rua João de Deus, Rua Lourenço Almeida, Praça da República, Avenida Sá da Bandeira, Rua Olimpo Nicolau Rui Fernandes, Rua da Sofia, Rua João Machado, Avenida Fernão de Magalhães, até à Rua António Granjo.

3.3.2 Rede de Tração alimentada pela Subestação do Calhabé

A Rede de Tração alimentada por esta subestação e conforme se pode visualizar na figura (3.3) é na sua extensão e no que diz respeito à *Rede de Serviço em Cheio*, significamente mais pequena face à *Rede de Serviço em Cheio* alimentada pela Subestação de Montarroio.

A *Linha nº 4* é alimentada por esta subestação, apenas no sentido descendente, a partir da Avenida Dr. Dias da Silva, seguindo para a Rua de Santa Teresa, Rua da Artilharia 21, até à Rotunda João Paulo II.

A *Linha nº 103* é alimentada, também no sentido ascendente, a partir do início da Alameda Júlio Henriques (junto aos Arcos do Jardim), seguindo para a Avenida Marnoco e Sousa e Avenida Dias da Silva (até às imediações do Pavilhão dos Olivais).

A alimentação entre a Subestação do Calhabé e a *Rede de Serviço em Vazio* é efetuada através da Rede de Tração instalada na Rua dos Combatentes até ao cruzamento da Alameda Júlio Henriques com a Avenida Marnoco e Sousa, conforme o indicado a vermelho na figura (3.3).

Para além disto, esta subestação alimenta também a parte mais significativa da *Rede de Serviço em Vazio*, comum às duas linhas em serviço e que vai desde a Avenida Cidade Aeminium (junto Hotel Astória), sentido ponte de Santa Clara, Ponte de Santa Clara, Avenida de Conimbriga, até à Estação de Depósito. Em sentido oposto, desde a Estação de Depósito, Avenida de Conimbriga, Avenida António Verney, Avenida da Guarda Inglesa, Avenida João das Regras, Ponte de Santa Clara e Avenida Emídio Navarro, até junto do Hotel Astória.

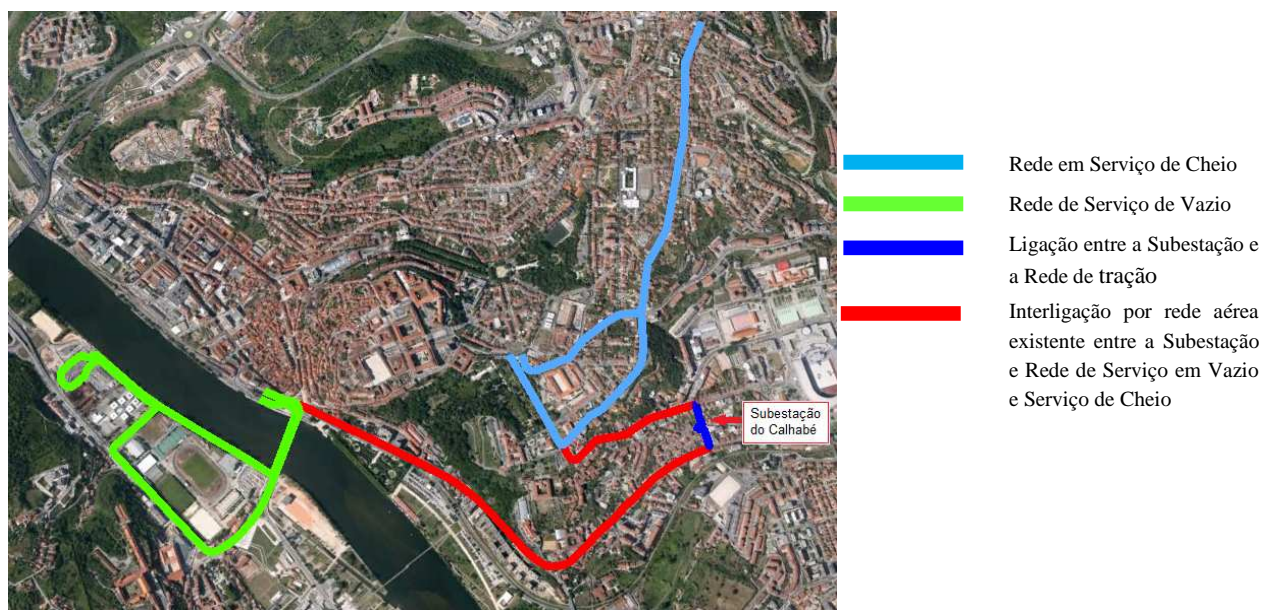


Figura 3.3 – Rede de tração alimentada pela subestação do Calhabé - (tratado pelo autor)

A alimentação entre a Subestação do Calhabé e a *Rede de Serviço em Vazio* é efetuada através da Rede de Tração instalada na Rua do Brasil, Ladeira do Batista e Emídio Navarro, até à Portagem, conforme se pode ver na figura (3.3).

Na figura (3.4) é apresentada a rede de tração em serviço existente atualmente na cidade de Coimbra



Figura 3.4 – Rede de tração geral - (tratado pelo autor)

3.4. Linhas em Serviço

As linhas atualmente em serviço são neste momento apenas duas, a *Linha nº4* e a *Linha nº 103*.

Estas linhas funcionam durante toda a semana excetuando, sábados, domingos, feriados e tipicamente durante todo o mês de agosto, onde são substituídas por viaturas a diesel, entre as 7h00 (com início cerca de 15 minutos antes na Estação Depósito na Guarda Inglesa), quando entra a primeira viatura troleicarro, até cerca das 21h00, quando a última viatura troleicarro deixa o serviço e chega à estação depósito.

Nas seções seguintes serão descritos os percursos de cada uma delas, bem como alguns dos seus aspetos mais importantes, tais com as suas extensões e características planimétricas.

3.4.1 Linha nº4

A *Linha nº 4* tem o seu início na *Estação Nova* e o seu percurso inclui passagem pela *Av. Fernão de Magalhães – Arnado – Jardim da Manga – Conchada – Montes Claros - Cruz de Celas – Stº António dos Olivais – Av. Dias da Silva – Arcos do Jardim – Praça da República – Manutenção – Palácio da Justiça – Av. Fernão de Magalhães e Estação Nova*. A extensão total desta linha é de 8,38 km. O seu percurso pode ser visualizado na figura (3.5).

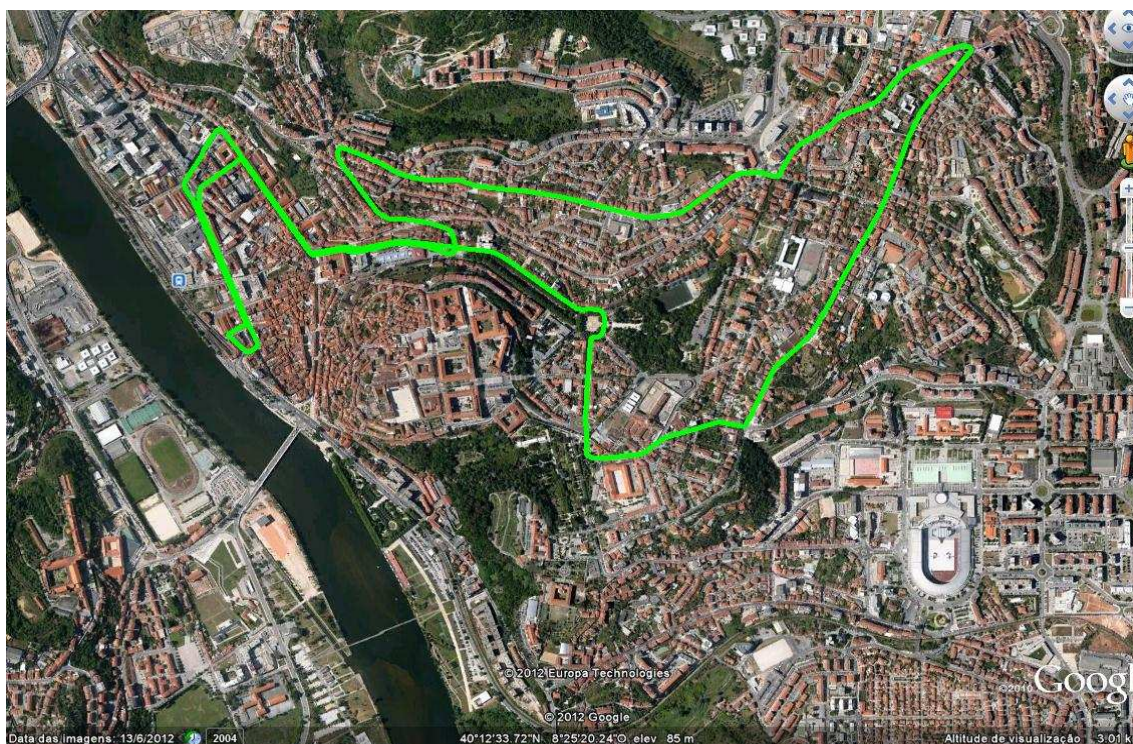


Figura 3.5 – Trajeto da *Linha nº 4* - (tratado pelo autor)

Apesar de ambas as subestações alimentarem esta linha, constata-se que esta é essencialmente alimentada pela subestação de Montarroio, excetuando o trajeto entre *Stº António dos Olivais*

e os *Arcos do Jardim* em que é alimentada pela subestação do Calhabé, tal como mostra a figura (3.6).

Um outro dado importante e que se pode também retirar da desta figura (3.6) é a orografia do trajeto. Este é um aspeto relevante, tendo em conta a cota altimétrica do início do percurso, na *Estação Nova* e o seu ponto mais elevado, que se situa em *Stº António dos Olivais*.

No seu geral a diferença de cotas entre estes dois pontos, obriga as viaturas troleicarro a vencerem um desnível de cerca de 140 m em pouco mais de 4.000 m de percurso, uma vez que a cota máxima é atingida precisamente em *Stº António dos Olivais* com uma cota altimétrica⁹ de 161,30 m.

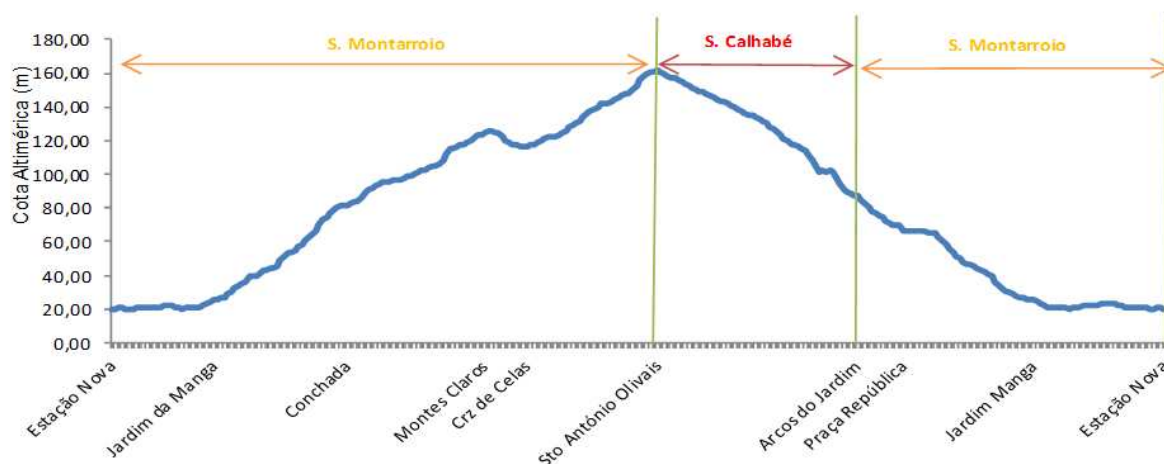


Figura 3.6 – Cota Altimétrica do percurso da *Linha nº4*

Da análise da evolução da cota altimétrica do percurso desta linha é também possível identificar a influência de cada uma das subestações no sentido ascendente ou descendente do percurso.

Para além disto, é também perceptível que no seu percurso ascendente a inclinação deste trajeto não é constante, podendo-se visualizar e identificar trechos onde este percurso tem inclinações positivas (que correspondem a subidas) com inclinações significativas, variando estas entre 4,01% e os 6,90% e um pequeno trecho onde a inclinação apresenta um valor negativo, (que corresponde a uma descida) de -3,11%, que corresponde a uma extensão 238m, compreendido entre *Montes Claros* e *Cruz de Celas*.

Na tabela (3.1) são apresentados trechos do percurso ascendente, com as respetivas inclinações e extensões.

⁹ As cotas altimétricas dos percursos, foram gentilmente cedidas pela Divisão de Projetos do Departamento de Obras e Infraestruturas do Município de Coimbra (Regulamento da Estrutura Orgânica Flexível da Câmara Municipal de Coimbra, aprovada por deliberações de 18 e 27 de fevereiro de 2013 do Executivo Municipal e da Assembleia Municipal Estrutura Orgânica publicada no Diário da República 2ª série – nº57, de 21 de março de 2013). Estas encontram-se georreferenciadas ao nível médio das águas do mar, tendo como ponto de referência o marégrafo de Cascais.

Tabela 3.1 – Inclinações de diversos trechos do percurso da *Linha n.º 4*

Início Trecho	Final Trecho	Cota inicial (m)	Cota Final (m)	Extensão Percurso (m)	Inclinação %
Jardim Manga	Conchada	25,05	82,00	826	6,90
Conchada	Montes Claros	82,00	124,00	1.047	4,01
Montes Claros	Cruz de Celas	124,00	116,60	238	-3,11%
Cruz de Celas	Sto. António Olivais	116,60	161,30	816	5,48

3.4.2 Linha n.º103

A *Linha n.º 103* também se inicia na *Estação Nova* e o seu percurso tem passagem por *Av. Fernão de Magalhães – Palácio da Justiça – Mercado D. Pedro V – Rua Padre António Vieira – Museu Machado de Castro – Universidade – Arcos do Jardim – Penedo da Saudade – Av. Dias da Silva – St.º António dos Olivais – Cruz de Celas – Rua Augusta – Praça da República – Manutenção – Palácio da Justiça – Av. Fernão de Magalhães e Estação Nova*, completando uma extensão total de 8,77 km. Na figura (3.7), pode ser visualizado o trajeto desta linha.



Figura 3.7 – Trajeto da *Linha n.º 103* - (tratado pelo autor)

Também esta linha é alimentada pelas duas subestações. O percurso entre a *Estação Nova* e *Arcos do Jardim* e o de *St.º António dos Olivais* e a *Estação Nova* é alimentado pela subestação de Montarroio e o percurso entre os *Arcos do Jardim* e *St.º António dos Olivais* é alimentado pela subestação do Calhabé, tal como mostra a figura (3.8).

Em termos de orografia do trajeto, constata-se que basicamente é muito semelhante à *Linha nº 4*, isto porque *Linha nº 103* também inicia na *Estação Nova* e passa em *Stº António dos Olivais*, sendo a distância entre estes dois pontos por este trajeto, sensivelmente a mesma, ou seja cerca de 4 000 m.

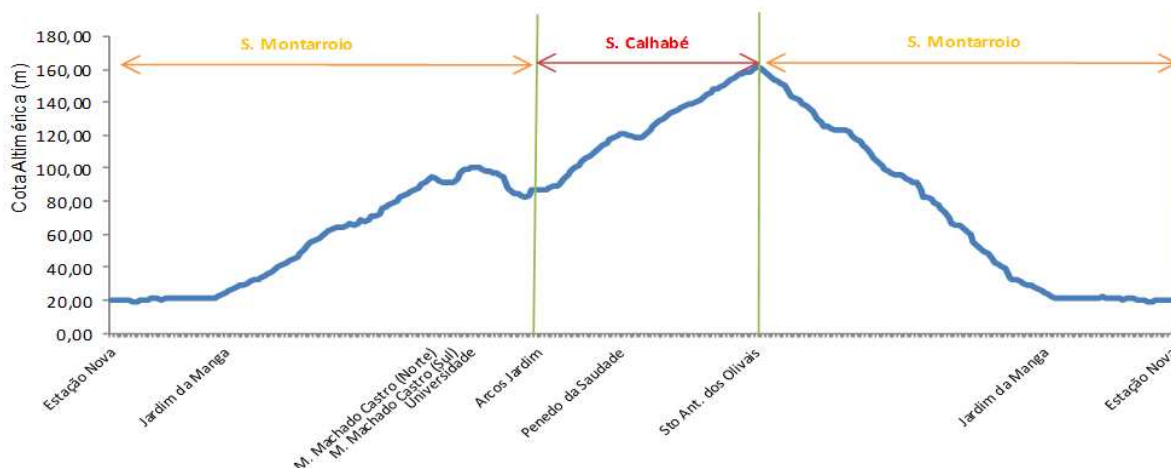


Figura 3.8 – Cota Altimétrica do percurso da *Linha nº103*

Analogamente ao efetuado no trajeto da *Linha nº4*, pode-se sectionar o trajeto ascendente da *Linha nº103*, em secções do percurso de subida. Também aqui se constata que a inclinação deste trajeto não é constante, conforme se pode visualizar na tabela (3.2).

Da análise a estes pequenos trechos são possíveis de indicar trechos de percurso onde a inclinação é também assinalável, com inclinações positivas, entre os 4,20% e os 6,15%. No que concerne trechos de percurso que evidenciem descidas, são possíveis de identificar dois, entre o *Museu Machado de Castro (Norte)* e *Museu Machado de Castro (Sul)* e entre a *Universidade* e os *Arcos do Jardim* que traduzem respetivamente numa inclinação de -2,54% e -3,11%.

Tabela 3.2 – Inclinações de diversos trechos do percurso da *Linha nº 103*

Início Trecho	Final Trecho	Cota inicial (m)	Cota Final (m)	Extensão Percurso (m)	Inclinação %
Jardim Manga	Museu Machado Castro (Norte)	23,40	94,40	1.128	6,15
Museu Machado Castro (Norte)	Museu Machado Castro (Sul)	94,40	91,00	134	-2,54
Museu Machado Castro (Sul)	Universidade	91,00	100,20	165	5,58
Universidade	Arcos Jardim	100,20	86,50	441	-3,11
Arcos Jardim	Penedo Saudade	86,50	120,76	815	4,20
Penedo da Saudade	Sto. António Olivais	120,76	161,30	1.400	2,90

Estes dados revelam a importância que a orografia da cidade de Coimbra e em particular a verificada nos percursos destas linhas tem para um sistema de tração elétrica.

Neste sentido, esta questão torna-se especialmente relevante na escolha adequada de autocarros cujas características mecânicas e de eficiência se adaptem melhor a este tipo de percurso.

3.5. Subestação de Montarroio

A Subestação de Montarroio é a mais antiga subestação em serviço da rede de troleicarros da Cidade de Coimbra. Está localizada na Rua de Montarroio tendo sido adquirida a 22 de setembro de 1956 à Empresa *Fonseca & Seabra, Limitada*. A entrada principal desta subestação pode ser visualizada na figura (3.9). [12]



Figura 3.9 – Entrada da Subestação de Montarroio

A subestação desenvolve-se em dois andares. Ao nível do R/Chão está situada a entrada do edifício e aí estão instalados as celas de corte de média tensão (referente à entrada de energia), os equipamentos de medida, os grupos retificadores e os circuitos de saída em corrente

continua que por meio de cabos aéreos são levados até à rede de tração na Rua Olimpo Nicolau Fernandes e até à Rua de Saragoça, esta última via cabo subterrâneo.

No Piso -1, estão localizados os transformadores e o Quadro de Distribuição de Corrente Contínua. O acesso a este piso, é garantido por uma escada metálica em caracol, mas para efeitos de substituição de equipamento ou em caso de necessidade, existe um acesso no pavimento do R/Chão da subestação, em chapas de ferro amovível sendo possível por meio de roldanas proceder-se à substituição de qualquer equipamento aí instalado.

Esta subestação é alimentada a partir da subestação da EDP-Distribuição, localizada a escassos metros desta, por meio de um transformador trifásico (15/6 kV) com enrolamento primário em estrela e o secundário em triângulo. Este transformador encontra-se situado no exterior do Posto de Transformação da EDP-Distribuição. Seguidamente, um cabo armado $3 \times 95 \text{ mm}^2$, instalado em canalização enterrada, liga este transformador ao barramento de média tensão do Quadro de Média Tensão, conforme se pode ver na figura (3.10). Dois seccionadores tripolares manobráveis em vazio e dois disjuntores automáticos de saída (6 kV/200 A), da marca *Brush Company*, servem de proteção térmica individual aos dois grupos transformador-retificador.



Figura 3.10 – Quadro Blindado de Média Tensão (6 kV – 200 A)

Os transformadores são de arrefecimento natural em banho de óleo. Os seus enrolamentos primários são trifásicos, em estrela e são dotados de duplo secundário, com ligações em estrela e triângulo, desfasada cada uma delas de 30° .

Os primários dos transformadores, são ainda dotados de um comutador de regulação de tensão em vazio, $\pm 3 \times 2.5\%$. É ainda constituído de por um terceiro enrolamento, instalado no secundário, com proteção por fusíveis e com ligação triângulo-estrela, que serve para alimentação aos serviços auxiliares do grupo retificador, como por exemplo a alimentação do sistema de ventilação das ampolas de mercúrio. Na figura (3.11), pode-se ver um dos transformadores em serviço.



Figura 3.11 – Transformador de 843 kVA de um dos grupos transformador – retificador da subestação de Montarroio

Cada grupo retificador é constituído por quatro ampolas retificadoras com vapor de mercúrio em vácuo. Instaladas por debaixo destas, encontra o equipamento auxiliar, tal como fusíveis de proteção, bobines anódicas para a repartição equilibrada da carga nas ampolas, transformadores auxiliares relés de excitação e um sistema de ventilação. A figura (3.12) mostra um dos grupos Retificadores da subestação de Montarroio.



a) b)
Figura 3.12 – a) Um dos grupos retificadores
b) Sistema de ventilação e ampolas de retificação em funcionamento

A ventilação é assegurada por ventiladores individuais instalados diretamente por baixo de cada uma das ampolas, ajustando automaticamente a sua velocidade com a carga suportada por cada uma destas.

O grupo de transformação-retificação está projetado para 100% da corrente nominal continuamente, 150% da corrente nominal durante 2 horas e 300% da corrente nominal durante 1 minuto.

O Quadro de Distribuição de Corrente Contínua à tensão de 600 V e que se pode visualizar na figura (3.13) é composto por 9 módulos. Começando da esquerda para a direita tem-se;

- Um Módulo de Entrada, ou seja, o painel que recebe a corrente dos grupos de transformação-retificação e que é constituído por dois seccionadores bipolar de corte em vazio, ou seja, um por cada grupo transformador-retificador.
- Um Módulo de Medidas, constituído por um amperímetro e voltímetro.
- Seis Módulos de Saídas, constituída individualmente por um disjuntor unipolar de 1000A ultra-rápido, da marca *Bertrand Thomas*, sendo acionado eletricamente ou manualmente por alavanca, com disparo automático de sobreintensidade, de corte escalonado, proteção contra sobreintensidades de origem atmosférica, reengate repetido após curto-circuito externo de pequena duração e disparo definitivo.

Para além disto, cada saída é dotada de um seccionador bipolar de corte em vazio de 1 600 A, um relé de distância (proteção contra curto-circuitos possíveis de existir na rede), um relé de reengate (para rearme e ligação do circuito de alimentação respetivo) e interruptor de comando.

Estes são os componentes mais importantes no funcionamento desta subestação. Acresce ainda dizer, que todos os equipamentos demonstram estar num bom estado de conservação e em pleno funcionamento, apesar já da sua avançada idade, excetuando os amperímetros e voltímetros existentes nos diversos equipamentos.



Figura 3.13 – Quadro de Distribuição de Corrente Contínua

No entanto, a utilização de retificadores a vapor de mercúrio, levanta uma questão séria, relacionada com a poluição ambiental e o perigo para a saúde pública da utilização de uma substância química, nociva e perigosa para o Homem.

Hoje sabemos quais os problemas que podem advir de um eventual derrame ou libertação para a atmosfera deste metal pesado. Este assunto torna-se ainda mais importante, pela localização desta subestação. Esta encontra-se paredes-meias com uma escola secundária, onde a permanência de crianças e jovens é por demais evidente.

Será sem dúvida um ponto que urge resolver e que passa pela substituição do tipo de tecnologia desta subestação, por outra que revele a este nível, uma interação com o ambiente e com a saúde pública, mais passiva.

Um outro ponto que também tem de ser revisto, é a interligação desta subestação com a rede de tração, situada na Rua Olimpo Nicolau Fernandes. Presentemente esta interligação efetua-se por via aérea, com os cabos suspensos, sobre as instalações desportivas ao ar livre da Escola Secundária Jaime Cortesão, influenciando, quer se queira quer não, a prática desportiva neste recinto. Esta situação pode ser visualizada na figura (3.14).



Figura 3.14 – Interligação da alimentação entre a subestação de Montarroio e a rede de tração, junto ao Mercado Municipal D. Pedro V.

3.5.1 A Utilização de Mercúrio na Atividade Humana

A existência de mercúrio ocorre naturalmente na natureza podendo a sua distribuição no ambiente ser efetuado por meio de processos naturais ou antropogénicos. A maior fonte de mercúrio é a crosta terrestre sendo libertado através da sua desgaseificação natural (2 700 a 6 000 toneladas por ano), incluindo áreas de terra, vulcões, rios e oceanos. [33]

A utilização do mercúrio na atividade humana remonta à pré-história, quando o *Cinnabar* (sulfureto de mercúrio) era utilizado para efetuar desenhos nas cavernas, então habitadas pelo Homem. Vestígios de compostos de mercúrio foram também encontrados em túmulos

egípcios, especulando-se que seriam utilizados como conservantes ou purificador de espíritos malignos. Mais tarde, já na Idade Média usava-se especialmente no tratamento de sífilis onde a aplicação em pequenas quantidades eram eficazes, mas quando aplicado em grandes doses se tornavam fatais para o paciente. [33] [34]

O mercúrio foi também usado durante os séculos XVIII e XIX como agente diurético e como agente anti-séptico, como por exemplo o mercurocromo e o cloreto mercúrico. [34]

Com a revolução industrial, a utilização deste metal pesado foi bastante vulgarizada em equipamento de monitorização tais como barómetros e termómetros de mercúrio, como elétrodo na produção eletrolítica de cloro e soda cáustica, em circuitos elétricos. [33] [34] [35]

Mais recentemente e já durante o século XX, a utilização do mercúrio, foi amplamente utilizado para aplicações medicinais, como por exemplo a construção amálgamas dentárias¹⁰ e como conservantes de vacinas. Teve também a sua aplicação na implementação de circuitos elétricos, sendo ainda hoje utilizado na indústria automóvel, na extração mineira de ouro e prata devido à capacidade do mercúrio líquido de formar amálgamas estáveis, especialmente com a prata e com o ouro¹¹. O mercúrio, ou os seus compostos, foram também amplamente usado na agricultura, como pesticida, na indústria cosmética e em tintas. [33] [34] [35]

A utilização de vapor de mercúrio e a sua aplicação à eletrotécnica remonta ao início do século XX, mais concretamente ao ano de 1900 e foi levado a cabo por um engenheiro inventor chamado Peter Cooper Hewitt. Este descobriu que o sentido da corrente decorrente do estabelecimento de arco elétrico, num ambiente de vapor de mercúrio apenas se dá num sentido e que a queda de tensão associada a este arco elétrico é relativamente pequena. O resultado deste trabalho resultou num pedido de registo de patente¹² em 1901. [36]

Esta descoberta permitiu inventar primeiramente a lâmpada de vapor de mercúrio. Esta lâmpada é uma lâmpada de descarga de gás, que usa vapor de mercúrio produzido pela passagem de corrente através de mercúrio líquido, sendo a sua eficiência muito maior do que as lâmpadas incandescentes existentes na altura, contudo esta lâmpada emitia uma cor desagradável (cor verde-azulado). Este fato terá limitado o seu uso prático apenas em áreas profissionais específicas, como a fotografia que nesta altura se cingia ao preto e branco. [37]

Mais tarde na década de 1930 a adição de um revestimento fluorescente (fósforo) a uma lâmpada tubular permitiu que esta produzisse uma luz branca mais agradável, uma vez que o fosforo absorve a luz ultravioleta do mercúrio. Este conceito terá originado o surgimento da lâmpada fluorescente tubular e mais recentemente a lâmpadas fluorescente compacta. [34] [37]

¹⁰ A amálgama dentária é constituída por uma mistura de metais geralmente nas proporções de 50% de mercúrio metálico, 35% de prata, 9% estanho, 6% de cobre e vestígios de zinco e é inserida nos dentes para cobrir os espaços vazios resultantes de cáries, adquirindo uma estrutura sólida em 30 minutos.

¹¹ Quando o produto da extração mineira, previamente misturado com mercúrio é sujeito ao calor, este evapora-se, resultando daqui o ouro ou a prata puros.

¹² Patente nº4168 de 1903.

A lâmpada de vapor de mercúrio foi também sofrendo evolução desde da sua invenção até aos nossos dias, tendo esta sido amplamente utilizada em sistemas de iluminação pública e iluminação industrial, pelo menos até cerca de uma década atrás, onde por questões ambientais e de saúde pública foi substituída por lâmpadas de vapor de sódio, cujo impacto no ambiente não é significativo.

Mas esta descoberta não teve só efeitos práticos no desenvolvimento em lâmpadas fluorescentes e de vapor de mercúrio. Em 1902, Hewitt desenvolveu o retificador de arco de mercúrio, o primeiro retificador que poderia converter energia de corrente alternada em corrente contínua sem meios mecânicos. Este sistema foi amplamente usado na eletrificação de redes de tração, na indústria, na galvanoplastia e transmissão de energia de corrente contínua de alta tensão. [37]

O aparecimento semicondutores de potência na década de 1970, que tornam os equipamentos mais compactos, robustos e com custos de exploração mais baratos, associados à consciencialização da problemática da utilização do mercúrio¹³, em particular nas consequências nefastas para o ambiente e saúde pública, levou a que os sistemas de retificação a vapor de mercúrio tenham vindo a ser substituídos por estes. [77]

De fato a quantidade de mercúrio líquido existente nestes sistemas é significativo. Para sistemas de retificação como é o caso da subestação de Montarroio¹⁴, constituída por um total de 8 ampolas (distribuídas por dois grupos de 4 ampolas cada) e com base nas dimensões das bases das ampolas (cátodo) e onde se encontra o mercúrio líquido, estima-se que possam coexistir cerca de 34,1 kg de mercúrio líquido (2,5 litros), o que não deixa de ser uma quantidade significativa.

A libertação de mercúrio no ambiente resulta em problemas graves para a saúde pública. Os fatores determinantes da exposição ao mercúrio são: [33] [34]

- A forma química do mercúrio e a sua dose;
- A idade da pessoa exposta (em que o feto é o mais suscetível) e a saúde da pessoa exposta;
- A duração da exposição;
- A via de exposição (inalação, ingestão, contato com a pele, entre outros);

O mercúrio encontra-se presente em diversas formas (*Hg* metálico, orgânico, inorgânico) sendo em geral facilmente interconvertíveis na natureza, pelo que tanto os humanos como os animais estão expostos a todas as suas diversas formas através do ambiente. [34] [35] [38]

¹³ Nestes tipos de retificadores a quantidade de mercúrio pode ascender facilmente a algumas dezenas de litros.

¹⁴ Com base nas dimensões das ampolas estima-se que a capacidade volumétrica da base destas e onde se encontra o cátodo e o mercúrio líquido seja cerca de 2.500cm^3 (2,4 litros) a que corresponde cerca 87,5kg de mercúrio líquido ($\rho=13\,579\text{ kg/m}^3$ a 20°C).

As principais formas químicas do mercúrio que acarretam problemas à saúde dos seres vivos, em particular na saúde humana e por grau de toxicidade crescente são:

- *Mercúrio Elementar (metal puro, em estado líquido ou em vapor - Hg)*

Os efeitos para a saúde são entre outras: tremores, alterações emocionais, insónias, alterações neuromusculares, dores de cabeça, distúrbios em sensações, défices de desempenho em testes de função cognitiva. Em exposições elevadas pode haver efeitos renais, insuficiência respiratória e morte. [34] [38] [39]

- *Compostos Inorgânicos (cloreto de mercúrio - HgCl₂);*

Os sintomas de alta exposição ao mercúrio inorgânico incluem danos no sistema renal, sistema nervoso e sistema gastrointestinal, erupções cutâneas e dermatites, mudanças de humor, perda de memória, distúrbios mentais e fraqueza muscular. [34] [38] [39]

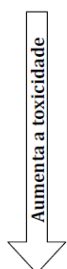
- *Compostos orgânicos como o metilmercúrio (CH₃Hg⁺)*

Forma mais tóxica e letal do mercúrio e resulta do consumo humano de peixes, crustáceos e moluscos que contêm *metilmercúrio* em consequência da sua biomagnificação¹⁵. Para fetos, bebés e crianças, os efeitos de saúde primária do *metilmercúrio*, entre outros, resultam em deficiências do desenvolvimento neurológico, impactos negativos sobre o pensamento cognitivo, perda de memória, deficit de atenção, atraso na linguagem, descoordenação da motricidade fina, e deficiência nas habilidades visuais e espaciais. [34] [38] [39]

Na tabela (3.3) são resumidos os mecanismos de absorção, eliminação e efeitos na saúde das diferentes espécies mercuriais.

Tabela 3.3 – Mecanismos de absorção, eliminação e efeitos na saúde das diferentes espécies mercuriais [38]

Forma química	Absorção	Eliminação	Efeitos
Mercúrio elementar Hg ⁰	Pulmões (alvéolos pulmonares)	Urina, fezes, ar expirado, suor e saliva	Diminuição cognitiva, alterações emocionais, perda de memória a curto prazo, irritabilidade e afastamento social
Mercúrio inorgânico Hg ⁺ e Hg ²⁺	Tracto intestinal	Fezes e ar expirado	Toxicidade gastrointestinal severa, choque sistémico e falência renal
Mercúrio orgânico (metilmercúrio)	Tracto intestinal, penetrando facilmente na corrente sanguínea. O MeHg liga-se facilmente aos grupos sulfidril	Fezes (na forma de Hg inorgânico)	Parestesias nas extremidades e à volta da boca, ataxia, constrição do campo visual, hiperactividade, surdez, cegueira, atraso mental, paralisia geral, problemas de linguagem, concentração e organização espacial



¹⁵ Tanto os metais pesados como as dioxinas caracterizam-se por ser bioacumuláveis, querendo isto dizer o corpo humano acumula-os sem os conseguir eliminar. Desta forma, mesmo pequenas quantidades ao longo do tempo podem resultar em riscos gravíssimos para a saúde. A esta situação acresce o problema da biomagnificação, onde se verifica que a exposição a estes poluentes é tanto maior quanto mais se sobe na cadeia alimentar, estando o ser humano no topo dessa mesma cadeia alimentar.

No que concerne à relação entre o mercúrio e o cancro, não existem indícios que a exposição a qualquer forma de mercúrio provoque qualquer efeito cancerígeno, contudo os dados disponíveis são muito limitados. No entanto, a utilização de cloreto de mercúrio em laboratório causou aumentos de vários tipos de tumores em ratos domésticos, tendo o *metilmercúrio* causado tumores renais. Estes efeitos só foram detetados quando aplicados em doses extremamente elevadas. Face a estes dados, este estudo concluiu que quer o mercúrio inorgânico quer o *metilmercúrio* em exposições ambientais normais, não são suscetíveis de causar cancro nos seres humanos. [23]

As concentrações de mercúrio no corpo humano (e suas espécies mercuriais) estão assim diretamente relacionados com o contacto que cada pessoa tem com este metal pesado. É expectável, por exemplo, que uma pessoa que consuma muito peixe, tenha uma maior concentração de mercúrio no seu organismo. Isto é facilmente explicado pela bioacumulação do mercúrio dentro da cadeia alimentar humana referente ao consumo de peixe.

Na tabela (3.4) estão indicados os níveis de referência de concentrações de *metilmercúrio* consoante o hábito alimentar. O nível considerado para as grávidas tem a ver com a recomendação de ingestão de determinadas espécies de peixes (ricos em ómega3 e ómega6) com vista a uma gestação saudável.

Tabela 3.4 – Níveis de referência de concentrações de *metilmercúrio* [34]

Metilmercúrio – Níveis de referência	
Sangue	1 a 8 µg/L
Urina	4 a 5 µg/L
Pessoas que habitualmente não ingerem peixe	2 µg/L sangue
Pessoas com elevado consumo de peixe	200 µg/L
Grávidas	Inferiores a 40 µg/L

Na tabela (3.5) estão indicados os valores limite considerados como de risco na ingestão de Cloreto Mercúrico e inalação de Vapor de Mercúrio.

Tabela 3.5 – Níveis mínimos de risco¹⁶ referentes á ingestão por via oral de Cloreto Mercúrico e inalação de Vapor de Mercúrio [34]

Nível mínimo de risco	
Cloreto Mercúrico (via oral)	Agudo: 7 µg/kg/dia
	Intermédio: 2 µg/kg/dia
Mercúrio (inalação)	Crónico 0,2 µg/m ³ (vapor de mercúrio)

¹⁶ Tabela adaptada de: Mercury; ToxFAQs: CABSTM/Chemical Agent Briefing Sheet; ATSDR / Division of Toxicology and Environmental Medicine; 2006.

A aplicação industrial do mercúrio e seus compostos no passado, bem como o seu uso difundido na agricultura devido ao uso de compostos orgânicos de mercúrio em pesticidas e fungicidas, tem resultado em sérios problemas de contaminação de solos, águas e sedimentos, e por conseguinte, com sérios danos para a fauna, a flora e para saúde pública. [34] [35] [38]

Na tabela (3.6) encontra-se resumida as relações entre a forma química, propriedades, características e aplicações do mercúrio (e espécies mercuriais) na atividade humana.

Tabela 3.6 - Relação entre a forma química, propriedades, características e aplicações do mercúrio. [38]

Forma Química	Propriedades e Características	Aplicações
Metal	Líquido à temperatura ambiente, expansão volumétrica uniforme numa gama vasta de temperaturas, tensão superficial elevada, não aderência a superfícies vítreas	Aparelhos de medição de pressão e temperatura: termómetros, barómetros, manómetros
	Baixa resistência eléctrica e elevada condutividade térmica	Materiais eléctricos e electrónicos, agente termostatzante
	Elevado potencial de oxidação, em relação ao H_2	Indústria de cloro e soda
	Facilidade de formação de amálgamas com outros metais	Metalurgia, odontologia, exploração mineira
Compostos inorgânicos	Elevada estereoespecificidade	Catálise na indústria de polímeros sintéticos
Compostos orgânicos	Poder de assepsia por oxidação de matéria orgânica	Insecticidas, bactericidas, fungicidas

A distribuição do mercúrio numa dada área depende deste modo das fontes locais, regionais, nacionais e até internacionais de mercúrio emitido. As fontes principais de contaminação ambiental em relação ao mercúrio são em resumo as seguintes: [35]

- Emulsões marinhas;
- Poeiras e emissões vulcânicas espalhadas pelo vento;
- Exploração mineira a céu aberto;
- Combustão de carvão e combustíveis fósseis;
- Emissões de indústrias químicas e de papel;
- Produção de lâmpadas eléctricas e seu destino final não controlado;
- Lamas domésticas, produzidas em zonas onde o mercúrio abunda, por razões geológicas ou antropogénicas.

A forma de limitar a existência de mercúrio no ambiente e consequentemente limitar os seus efeitos tóxicos na saúde pública e no ambiente é legislar no sentido de diminuir as emissões deste metal pesado pelas ações antropogénicas. Nesse sentido, nestes últimos anos e face a uma cada vez maior consciencialização destes problemas, a utilização do mercúrio e das suas

espécies mercuriais têm tido uma forte restrição legal, quer ao nível de legislação nacional quer até comunitária.

3.6 Subestação do Calhabé

A subestação do Calhabé está situada na Rua Teodoro, junto ao Mercado do Calhabé e está instalada num edifício de R/Chão, conforme ilustra a figura (3.15).



Figura 3.15 – Subestação do Calhabé

Esta subestação é mais recente e moderna do que a subestação de Montarroio, sendo a sua tecnologia baseada no funcionamento dos díodos, solução tecnológica típica dos anos 70 do século passado.

Numa primeira análise poderá parecer que esta subestação está deslocada face às linhas existentes e em funcionamento na cidade conforme se poderá visualizar na figura (3.1). A atual realidade está longe daquela que levou à sua construção. A construção desta subestação ocorre no último terço do século passado e acontece pela necessidade de alimentar a rede de tração, que a partir do início dos anos 50, é ampliada a esta zona da cidade, então em expansão, originando um incremento no número de linhas de troleicarros que ligavam o centro da cidade de Coimbra e a Universidade ao Calhabé.

A ampliação do número de linhas de troleicarros, em que parte da rede de tração era alimentada por esta subestação, deu-se até ao início dos anos 90, mais concretamente até 12 de Maio de 1991, com a entrada ao serviço das *Linhas nº7 (Arnado – Tovim)* e *7T (Palácio da Justiça – Tovim)*, atualmente operadas por autocarros a diesel. [12]

A partir dos meados dos anos 90 e até aos nossos dias, com a saída e abate de um número elevado de viaturas troleicarro e com a consequente substituição destas por viatura a diesel, esta subestação passou apenas a alimentar uma parte da secção da *Linha nº4* e *Linha nº 103* que se encontram atualmente em funcionamento, conforme se pode verificar na figura (3.3).

A entrada de energia é subterrânea e provem de uma subestação da EDP-Distribuição contígua. A alimentação é efetuada a 15 kV, por meio de um cabo armado 3x50 mm². É constituída por um grupo transformador-retificador de 600 kW (600 V/1000 A) e contempla ainda uma bobine de alisamento.

A entrada de energia é efetuada por um Quadro de Média Tensão, constituído por 5 celas de Média Tensão de corte ao ar, duas de entrada (uma delas com um circuito de reserva desde a subestação da EDP), uma celda de medidas, uma celda de proteção com disjuntor e ainda uma celda que alimenta os serviços auxiliares, conforme se pode ver na figura (3.16).



Figura 3.16 – Celas de Média Tensão

A alimentação ao transformador do grupo é efetuada pela celda de proteção, por meio de canalização pré-fabricada e embebida no pavimento. O transformador tem uma potência de 670 kVA e é de arrefecimento natural em banho de óleo. Os seus enrolamentos primários e secundários são trifásicos, com ligação em estrela, conforme ilustra a figura (3.17).



Figura 3.17 – Transformador do Grupo Retificador

A potência nominal do retificador é de 600 kW, sendo este alimentado pelo secundário do transformador através de barras de cobre instaladas ao ar. Este retificador é constituído por 15 díodos (5 por ramo) em ponte trifásica de Graetz com ventilação forçada.

Na figura (3.18) pode-se ver o pormenor deste retificador, equipado com cinco díodos por ramo.

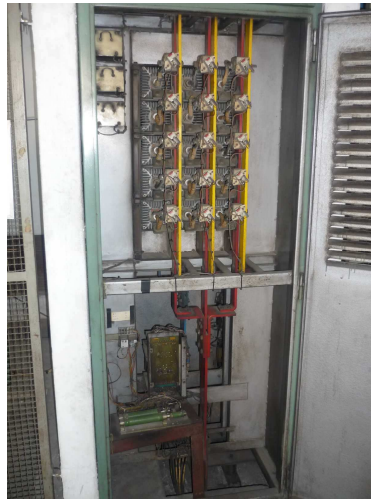


Figura 3.18 – Interior do retificador da subestação do Calhabé constituído por cinco díodos por ramo

A bobina de alisamento tem um valor de indutância de 0,5 mH /1000 A e encontra-se ligada à saída do retificador (barramento DC). A tensão no barramento DC é 600 V.

O Quadro Geral de Corrente Contínua é contíguo à bobina de alisamento e é constituído por quatro saídas, encontrando-se, neste momento, apenas duas em serviço. As suas saídas são protegidas por fusíveis. Um barramento trifásico, constituído por barras de cobre, interliga todos os equipamentos, desde do secundário do transformador, até ao Quadro Geral de Corrente Contínua. Neste quadro existe ainda um painel com equipamento de medida. Na figura (3.19) pode-se ver a disposição na subestação dos equipamentos descritos.



Figura 3.19 – Transformador, retificador, bobina de alisamento e Quadro Geral de Corrente Contínua

3.7. Caracterização das Viaturas Troleicarro Existentes

Não sendo um problema propriamente dito, esta caracterização, mesmo sucinta das viaturas troleicarro é importante, tanto mais que são estas as cargas que as subestações apresentadas têm que alimentar, através da rede de tração.

Por conseguinte serão as subestações que de acordo com as características das planimetrias de cada um dos trajetos têm que garantir e fornecer a energia necessária para que estas viaturas possam efetuar a sua mobilidade.

É facilmente perceptível a necessidade de apresentar, tal com o foi feito nas secções 3.4.1.1 e 3.4.1.2 as planimetrias destes trajetos, uma vez que a deslocação das viaturas em planos com inclinações negativas (descidas) ou planos com inclinações positivas (subidas) é sob o ponto de vista de consumo energético, totalmente diferente.

Um outro aspeto importante é a tecnologia de cada um dos tipos de viaturas troleicarro existentes. Neste caso, as viaturas em serviço na cidade de Coimbra são de dois tipos:

- Viaturas *Efacec/Salvador Caetano* – Fornecidas aos serviços SMTUC entre Março de 1984 e Dezembro de 1985, num total de 20 viaturas, dotadas com motor de tração de corrente contínua, excitação série, tipo TB100 SP (130 kW; $U_n=550$ V; 1306 rpm) e uma intensidade nominal (I_n) de 262 A e sem grupo de emergência.

O sistema de comando é controlado reostaticamente, no regime de tração com 14 pontos (13 deles com resistência de arranque) e no regime de frenagem (travagem elétrica) com 14 pontos. Este sistema é controlado por um regulador eletrónico.

Não tem a capacidade de regenerar¹⁷ para a rede de tração, a energia proveniente da travagem regenerativa, sendo esta debitada em resistências sobre o tejadilho e consumida por efeito de Joule.

O motor tem corrente máxima admissível em tração de 400 A e em frenagem de 200 A.

- Viatura *Skoda/Trolino Solaris*, - Fornecida aos serviços SMTUC no final de 2009 e única é dotada de um motor de tração indução de 4 pólos, tipo ML 3550/K4 da *Skoda* (210 kW; 1479 rpm) e uma intensidade nominal (I_n) de 351 A. É dotada ainda com um grupo de marcha de emergência autónoma a Diesel de 100 kW da Kirsh.

Tem capacidade de regeneração de energia para a rede de tração, provinda da travagem regenerativa do veículo.

As características do motor ML 3550/K4, tais como as velocidades, consumos, podem ser visualizadas na figura (3.20).

¹⁷ Para o motor de corrente contínua tipo série regenerar energia é necessário que o sentido de rotação do veio do motor se inverta, ou seja teria que inverter o sentido de marcha, andando este em marcha atrás.

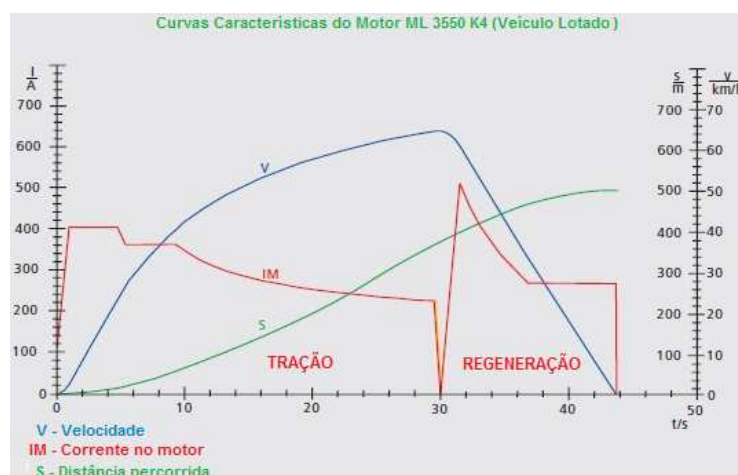


Figura 3.22 – Curvas Caraterísticas do motor de tração ML 3550/K4 Skoda em linha em http://www.vossloh-kiepe.com/electric-buses/trolleybuses/references/athens-greece.AthenII_485.pdf em 09.09.2013 - (tratado pelo autor)

No que diz respeito aos consumos energéticos deste motor, podemos referir que no arranque, a corrente do motor (IM) atinge os 400 A, ou seja cerca de $1,14 \times I_n$, ao fim de 1 segundo e mantém-se nesse valor durante 4 segundos. Seguidamente a corrente no motor decresce até à intensidade nominal que é atingida aos 6 segundos após o arranque e mantida durante 4 segundos. Depois deste tempo a intensidade do motor decresce até atingir os 220 A (ao fim de 30 segundos) atingindo uma velocidade de cerca 65 km/h.

Na desaceleração (frenagem), verifica-se um pico de corrente, durante sensivelmente 1,5 segundos, atingindo os 500 A para depois decrescer, ao longo de todo o processo de frenagem, atingindo valores ligeiramente inferiores aos valores nominais.

3.8. Conclusões

Os SMTUC, conforme vimos, têm como missão “*garantir uma oferta de transporte público adequada às necessidades das populações desenvolvendo ações que privilegiem a opção do uso do transporte público*”.

Durante o ano de 2012, foram transportados por estes serviços, cerca de 14 843 000 passageiros e destes, cerca de 623 000 foram transportados pelas viaturas troleicarro, pelas duas linhas de viaturas troleicarro que estão ainda em serviço, a *Linha nº 4 (Estação Nova – Stº António dos Olivais via Celas)* e a *Linha nº103 (Estação Nova – Stº António dos Olivais via Universidade)*.

Ambas as linhas têm diferença de cotas entre o início de cada um dos percursos, que obriga as viaturas troleicarro a vencerem um desnível de cerca de 140 m em pouco mais de 4 000 m de

percurso, uma vez que a cota máxima é atingida precisamente em *Stº António dos Olivais* com uma cota altimétrica de 161,30 m. Para além disso têm ainda pequenos trechos com inclinações relevantes e muito próximos dos 7%.

Estes dados são importantes pois, tendo em conta a melhor eficiência energética, das viaturas troleicarro face a viaturas a diesel, torna os troleicarros especialmente dotados para trajetos onde existam inclinações relevantes, face às outras viaturas (a diesel). Assim, a opção destas linhas serem operadas com troleicarros é a mais acertada.

Um outro ponto muito importante e que ressalta da caracterização das subestações existentes, é a tecnologia associada à subestação de Montarroio. Os perigos associados ao vapor de mercúrio e o seu contributo amplamente nefasto para o ambiente e saúde pública são questões para as quais não podemos ficar indiferentes.

A quantidade estimada de mercúrio líquido nesta subestação, que se estima em 2,5 litros a que corresponde cerca 34,1 kg de mercúrio líquido em comparação com as doses limites de ingestão e de inalação, respetivamente na ordem das $\mu\text{g}/\text{dia}/\text{kg}$ e $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de ar inalado (por pessoa), levam a pensar seriamente no perigo para a saúde pública da população que vive, trabalha e estuda nas imediações desta subestação, instalada junto ao centro da Cidade de Coimbra.

Contudo a questão ambiental das subestações não se fica por aqui. Podemos afirmar genericamente que a classe de eficiência energética de um dado equipamento é refletida pelo estado tecnológico deste. Neste sentido, importam também efetuar um estudo às características de cada uma das subestações e perceber os parâmetros de eficiência. Para além disto importa também perceber quais as características das cargas que elas alimentam, nomeadamente a evolução das potências que ambas alimentam ao longo do dia.

É esse o caminho seguido no capítulo seguinte. Caracterizar o consumo e a eficiência energética destas subestações, auxiliará inequivocamente na obtenção de soluções mais adaptadas à realidade da rede de tração da Cidade de Coimbra e responderá ao objetivo desta dissertação, que se centra na obtenção de propostas de melhoria da eficiência energética dessas mesmas subestações.

4. ANÁLISE DE OPERAÇÃO DAS SUBESTAÇÕES RETIFICADORAS

4.1. Introdução

No final deste capítulo após análise da operação de cada uma das subestações, é pretendido chegar às características que cada uma delas apresenta nomeadamente nos seus consumos o que permitirá perspetivar as soluções viáveis, sob o ponto de vista técnico, tendo em vista a substituição do(s) equipamento(s) existente(s), por outro(s) energeticamente mais eficiente(s) e ambientalmente mais sustentáveis.

Contudo para se chegar a estas soluções, esta análise terá que se desenvolver sob duas vertentes. A primeira diz respeito ao regime transitório das solicitações de serviço e a outra diz respeito à análise e recolha de dados, numa escala temporal maior.

O regime transitório das solicitações de serviço resulta do arranque em simultâneo de várias viaturas troleicarro cuja possibilidade de ocorrência tem de ser prevista. Isto resulta do fato de ser durante este período que o consumo das viaturas é superior ao regime nominal, com a agravante de uma parte considerável dos percursos de cada uma das linhas serem efetuados em trajetos ascendentes.

Neste regime e em termos de escala temporal de análise este é muito breve, pois ocorre numa escala temporal de segundos (menos de 10 segundos).

Na vertente de análise e recolha de dados, numa escala temporal maior, esta contempla a recolha de dados, através de monitorizações efetuadas “*in situ*” por equipamentos de registo das grandezas nomeadamente tensões, correntes, fator de potência e distorção harmónica, durante o normal funcionamento da rede de tração.

Estas medições foram efetuadas em períodos de quartos de hora (15 minutos), para o qual os equipamentos de registo foram programados. Estas foram concretizadas durante uma semana nas duas subestações em simultâneo tendo-se recolhido os dados que permitem chegar aos consumos das potências ativa, reativa e de saída (P_{dc}) e também aos parâmetros de eficiência e distorção harmónica presente em cada uma das subestações.

Para além disso, far-se-á também uma análise de custos energéticos, referentes a um ano de consumo de energia elétrica com base nas faturas emitidas pelo comercializador. Esta análise debruçar-se-á sobre os custos energéticos de cada uma das subestações.

O objetivo deste capítulo traduzir-se-á no conhecimento do funcionamento do sistema e do seu consumo de energia o que permitirá posteriormente dimensionar as novas subestações, com uma potência adaptada ao serviço atual e com menor custo de operação, decorrentes de instalação de equipamentos mais eficientes.

4.2. Estudo Estatístico do Arranque de Viaturas Troleicarro

4.2.1. Caracterização dos Horários das Linhas nº 4 e Linhas nº 103

As operações das subestações retificadoras encontram-se, obviamente, condicionadas pelos horários de serviço dos troleicarros existentes. Face a esta evidência, o funcionamento das subestações foram alvo de análise neste trabalho e mais especificamente neste Capítulo. Esta análise teve por base os horários em vigor durante o ano de 2012¹⁸ e que se encontram evidenciados no Anexo 1.

A *Linha nº 4* inicia às 7h00m na *Estação Nova*, com a entrada ao serviço da primeira viatura, entrando uma nova viatura a cada 15 minutos até um máximo 3 unidades, ou seja às 7h15m entra a segunda viatura e às 7h30m a terceira e última viatura.

O horário das 7h45m é novamente assegurado pela primeira viatura e assim sucessivamente.

Nesta linha as viaturas troleicarro fazem por dia, o seguinte número de viagens:

A primeira viatura (chapa 34) – 17 viagens diárias, deixando o serviço às 19h45m;

A segunda viatura (chapa 18) - 18 viagens diárias, deixando o serviço às 20h40m;

A terceira viatura (chapa 19) – 17 viagens diárias, deixando o serviço às 20h10m;

A *Linha nº 103* opera também com três viaturas, começando a primeira a circular às 7h25m, com início na Estação Nova, a segunda viatura inicia às 7h 40m e a terceira às 7h55m.

As viagens efetuadas por dia, nesta linha são as seguintes:

A primeira viatura (chapa 1) – 15 viagens diárias, deixando o serviço às 20h15m;

A segunda viatura (chapa 8) - 14 viagens diárias, deixando o serviço às 19h35m;

A terceira viatura (chapa 9) – 14 viagens diárias, deixando o serviço às 19h55m;

O tempo previsto em ambas as linhas, até à chegada à estação depósito é de sensivelmente 15 minutos depois da sua saída de serviço.

A *Linha nº4* tem uma frequência de saída de 15 em 15 minutos, em todas as suas partidas, mas o mesmo não acontece com *Linha nº103*. Do estudo efetuado aos horários desta linha, verifica-se que em quarenta e três partidas previstas no horário, vinte e quatro são efetuadas com frequências de 15 em 15 minutos e as restantes dezanove de 20 em 20 minutos.

Estes dados serão de relevada importância e a ter em conta na análise do arranque simultâneo das viaturas troleicarro, que circulam nesta linha, pelo fato de condicionar o número de viaturas que estão a efetuam o trajeto ascendente ao mesmo tempo, conforme veremos de seguida, em particular nos horários de partidas consecutivas e coincidentes entre as duas linhas.

¹⁸Presentemente os horários em vigor sofreram alterações em relação aos que na altura desta análise vigoravam, mas apenas ao sábado, domingo e à noite, mantendo-se durante a semana, não afetando deste modo o funcionamento das viaturas troleicarro.



Figura 4.1 – Troleicarro Efacec/Salvador Caetano a efetuar a *Linha nº103* com o horário referente à chapa 1

4.2.2. Simultaneidade de Arranque de Viaturas Troleicarro

Nos sistemas de tração, a questão da simultaneidade do arranque das máquinas é um aspeto muito importante a ter em conta, pois o dimensionamento dos equipamentos elétricos, nomeadamente das subestações de retificação, como é este o caso, está diretamente relacionado com o número de máquinas que possam ou tendam a arrancar ao mesmo tempo.

Importa salientar que, é no arranque que o consumo, em cada uma das máquinas, é mais elevado. Se bem que, no caso de um arranque se efetuar num plano inclinado com a viatura a efetuar um trajeto descendente esta problemática possa ser irrelevante, o mesmo não se poderá dizer do arranque desta em trajeto ascendente.

Assim e de acordo com os trajetos de cada uma das linhas e apresentados neste trabalho nas secções 3.4.1.1 e 3.4.1.2, as respetivas subestações alimentam as linhas em serviço nos seguintes percursos ascendentes:

- Subestação de Montarroio
 - *Linha nº4 - Estação Nova – Sto. António dos Olivais (via Celas).*
 - *Linha nº103 - Estação Nova – Arcos do Jardim (via Universidade)*
- Subestação do Calhabé
 - *Linha nº103 - Arcos do Jardim (via Universidade) – Sto. António dos Olivais*

Todas as outras secções do percurso são alimentadas por estas subestações em percursos descendentes. Neste contexto, facilmente se conclui que a subestação de Montarroio é a subestação que sob o ponto de vista do “esforço” eletrodinâmico e térmico, é a mais requisitada. Isto advém porque opera as duas linhas, nos seus trajetos ascendentes, o que não

acontece na subestação do Calhabé, que alimenta, nestas condições, apenas uma secção da *Linha nº 103*.

Importa então saber o número de viaturas troleicarro, que se encontram nessas condições, ou seja, em processo de subida e em ambas as linhas e que reflexos podem ter estas contingências no funcionamento da subestação de Montarroio.

Pela análise dos horários de partida das viaturas, que se efetuou da secção 4.1 concluímos que, no que concerne à *Linha nº4*, cada viatura tem uma frequência de saída de 15 minutos e demora 25 minutos a percorrer o trajeto entre *Estação Nova – Sto. António dos Olivais (via Celas)*. Nestas circunstâncias, facilmente se conclui que nesta linha, as viaturas troleicarro que se encontram em operação conjunta de subida, são no máximo duas viaturas.

De forma análoga, foi feita uma análise para a *Linha nº103*. Para o efeito, utilizou-se a informação disponibilizada pelo sistema de gestão de frota existente a bordo de todas as viaturas dos SMUTC, incluindo nas viaturas troleicarro. Este sistema indica, paragem a paragem e à medida que se vai percorrendo o percurso, o tempo de chegada que está programado e o realmente efetuado, conforme se pode visualizar na figura 4.2. Recorrendo portanto a este sistema e mais concretamente para a *Linha nº 103*, é-nos indicado que o tempo programado entre a paragem *Estação Nova* e a *Universidade* é de 15 minutos, o que de acordo com informação recolhida junto dos motoristas, é facilmente cumprido.



Figura 4.2 – Sistema de gestão de frota com ligação GPS, existente a bordo das viaturas dos SMTUC à chegada à paragem Universidade com horário programado e real percorrido em 15 minutos

Ora, este fato leva a duas conclusões. A primeira é que quando a frequência de saída das viaturas é de 20 minutos apenas uma viatura da Linha nº 103 se encontra em processo de subida pois quando uma viatura, nestas condições, inicia a sua marcha já a sua precedente passou a paragem Universidade.

A segunda conclusão é que quando a frequência de saída das viaturas é de 15 minutos duas viaturas da *Linha nº 103* encontram-se em processo de subida, sendo esta simultaneidade apenas durante escassos minutos, pois quando uma viatura, nestas condições, inicia a sua marcha a sua precedente está a passar ou pelo menos está muito próxima da paragem Universidade.

4.2.3. Modelização Estatística da Probabilidade do Arranque

Para o desenvolvimento do modelo matemático para a probabilidade do arranque simultâneo pode-se utilizar uma distribuição de probabilidade de variável aleatória discreta que expressa a probabilidade de uma série de eventos (neste caso de arranque), poderem ocorrer num certo período de tempo, independentemente de quando ocorreu o último evento, ou seja uma distribuição de Poisson¹⁹.

Este tipo de distribuição é bastante utilizado na análise de problemas e previsões de trânsito, telecomunicações ou consumo de energia elétrica, entre outras por exemplo. [40] [41] [42] [43]

A distribuição de Poisson, indica que a probabilidade de existirem exatamente k ocorrências (k sendo um inteiro não negativo, $k=0, 1, 2$, etc.) é dada por:

$$f(k; \lambda) = \frac{e^{-\lambda} \cdot \lambda^k}{k!} \quad (4.1)$$

Onde, λ é um número real, igual ao número esperado de ocorrências que ocorram num dado intervalo de tempo, ou seja,

$$\lambda = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} \text{Ocorrências}}{\Delta t} \quad (4.2)$$

¹⁹ Esta distribuição foi descoberta por *Siméon-Denis Poisson (1781–1840)* e publicada, conjuntamente com a sua teoria da probabilidade, em 1838 no seu trabalho “*Recherches sur la probabilité des jugements en matières criminelles et matière civile*” (“Inquérito sobre a probabilidade em julgamentos sobre matérias criminais e civis”). O trabalho focava-se em certas variáveis aleatórias N que contavam, entre outras coisas, o número de ocorrências contínuas que tinham lugar durante um intervalo de tempo de determinado comprimento.

Uma aproximação que pode ser considerada é que a probabilidade de acontecer um evento em qualquer intervalo de tempo, não depende (no sentido de independência estatística) da probabilidade de acontecer em qualquer outro intervalo disjunto.

Neste caso, a solução para o problema é o processo estocástico²⁰ chamado de Processo de Poisson, que é dado por:

$$P[N(t) = K] = \frac{e^{-\lambda t} \cdot (\lambda t)^k}{k!} \quad (4.3)$$

Neste sentido, o número de eventos, durante um determinado tempo t é ainda uma distribuição de Poisson com parâmetro λ igual a λt .

Uma outra característica é a soma de variáveis de Poisson independentes, ser ainda uma variável de Poisson com parâmetro igual à soma dos respectivos parâmetros, ou seja, se $X_i \sim \text{Poisson}(\lambda_i)$, segue uma distribuição de Poisson, com parâmetro λ_i e se as variáveis aleatórias X_i forem estatisticamente independentes, podemos então definir que:

$$Y = \sum_{i=1}^n X_i \sim \text{Poisson}\left(\sum_{i=1}^n \lambda_i\right) \quad (4.4)$$

Esta equação segue também uma distribuição de Poisson cujo parâmetro é igual à soma dos λ_i .

Para o cálculo dos parâmetros λ de cada uma das linhas, foi considerado que cada evento de paragem, antecede um evento de arranque, num determinado intervalo de tempo.

No caso presente de estudo, este intervalo de tempo não é mais do que o tempo que, as viaturas troleicarro demoram a percorrer os trajetos ascendente de cada uma das linhas e que corresponde a 25 minutos na *Linha nº4* e de 15 minutos na *Linha nº 103* e que são alimentadas pela subestação de Montarroio, pelas razões já apresentadas.

Contudo, não se sabe quais as condições que levam uma viatura a arrancar, mas sabe-se quais as situações que a podem levar a parar. Assim, se uma viatura no decorrer da sua normal operação tem um evento de arranque, é porque o seu estado físico anterior era de paragem, ou seja, para haver um arranque terá de haver uma paragem prévia.

²⁰ Um processo estocástico é uma família de variáveis aleatórias indexadas por elementos t pertencentes a determinado intervalo temporal. Intuitivamente, se uma variável aleatória é um número real que varia aleatoriamente, um processo estocástico é uma função temporal que varia aleatoriamente. De forma simplificada, podemos dizer que processos estocásticos são processos aleatórios que dependem do tempo. Mais genericamente, qualquer tipo de evolução temporal (determinística ou essencialmente probabilística) que seja analisável em termos de probabilidade pode ser chamada de processo estocástico.

Neste contexto, procurou-se identificar em cada um dos trajetos situações que pudessem obrigar a viatura troleicarro a efetuar uma paragem. Para o efeito, foram contabilizadas para cada uma das linhas, os seguintes pontos de paragem:

- Abrigos de passageiros existentes (para entrada e saída de passageiros);
- Zona de atravessamento de peões (passadeiras);
- Cruzamento e locais com semaforizações (semáforos);

Ao contabilizar-se a paragem das viaturas troleicarro em todos estes pontos, está-se na prática a maximizar o número de eventos que poderá ocorrer, o que leva a aumentar por esta via a probabilidade do número de ocorrências em simultâneo, num dado intervalo de tempo.

É nestes pressupostos que se vai proceder ao cálculo dos parâmetros λ de cada uma das linhas, porém apenas nos seus trajetos ascendentes, pois conforme já se sabe, é nestes trajetos que o pára-arranca das viaturas e por conseguinte o seu consumo nominal, atingem valores mais elevados.

4.2.3.1. Parâmetro λ da Linha nº 4

A *Linha nº 4* contempla no seu percurso ascendente, os seguintes pontos com probabilidade de paragem, ou seja ocorrências de paragem:

- Número de pontos com semaforização – quinze (O_s);
- Número de paragem em abrigos de passageiros – onze (O_a);
- Número de passadeiras (sem semaforização) – vinte e um (O_p);

Nesta linha, as viaturas troleicarro fazem quarenta e sete paragens num intervalo de tempo Δt de 25 minutos, o que resulta do tempo percorrido entre as paragens Estação Nova – Stº António dos Olivais.

Com estes dados, o parâmetro λ desta *Linha nº 4* (λ_4) é dado por;

$$\lambda_4 = \frac{(O_s + O_a + O_p)}{\Delta t} \Leftrightarrow \lambda_4 = \frac{(15+11+21)}{25} \Leftrightarrow \lambda_4 = 1,88 \quad (4.5)$$

4.2.3.2. Parâmetro λ da Linha nº 103

Analogamente procedeu-se ao cálculo com os mesmos pressupostos para *Linha nº 103*.

Esta linha, por sua vez, contempla no seu percurso ascendente os seguintes pontos com probabilidade de paragem:

- Número de pontos com semaforização – doze (O_s)
- Número de paragem em abrigos de passageiros – oito (O_a)
- Número de passadeiras (sem semaforização) – sete (O_p)

O número total de possibilidade de paragens é de vinte e sete, num intervalo de tempo de 15 minutos, que decorre entre as paragens *Estação Nova – Universidade*.

Então, para a *Linha nº103*, o cálculo do parâmetro λ (λ_{103}) é dado por;

$$\lambda_{103} = \frac{(O_s + O_a + O_p)}{\Delta t} \Leftrightarrow \lambda_{103} = \frac{(12+8+7)}{15} \Leftrightarrow \lambda_{103} = 1,80 \quad (4.6)$$

4.2.4. Probabilidade de Arranque simultâneo em percurso de subida

Conforme já assinalado, é no arranque e nos percursos de subida de cada uma das linhas que a situação se pode tornar mais problemática uma vez que a corrente de arranque das viaturas troleicarro atinge valores superiores aos nominais.

Da análise aos horários de cada uma das linhas, o cenário mais crítico e do qual resulta a possibilidade de existirem quatro viaturas (duas viaturas em cada uma das linhas) em trajeto ascendente é o seguinte:

- O horário de saída da paragem *Estação Nova* coincidente nas duas linhas. Este cenário acontece às 10h15m, 10h30m, 10h45m, 12h45m, 13h00m e 13h15m, 15h15m, 15h30m e 15h45m e 17h15m e 17h30m, sendo que nestas condições é possível existirem quatro viaturas em processo ascendente.

Face ao exposto facilmente se percebe que estas situações são aquelas que se revelam mais exigentes para a subestação de Montarroio, uma vez que é nestas saídas que o número de viaturas troleicarro em trajeto de subida possam ser quatro viaturas.

Assim sendo, e por aplicação da equação (4.4) o parâmetro $\lambda_{sistema}$ é caracterizado então pelo funcionamento de duas viaturas da *Linha nº4* e duas da *Linha nº103*, cada uma delas com o seu parâmetro λ

Deste modo, o nosso $\lambda_{sistema}$ é dado por:

$$\lambda_{sistema} = 2 \times \lambda_4 + 2 \times \lambda_{103} \Leftrightarrow \lambda_{sistema} = 2 \times 1,88 + 2 \times 1,8 \Leftrightarrow \lambda_{sistema} = 7,36 \quad (4.7)$$

Considerando que o tempo de arranque das máquinas é no máximo de 10 segundos ($t = \frac{1}{6}$ de minuto) teremos um parâmetro $\lambda t = \lambda_{sistema} \times t \Leftrightarrow \lambda t = 7,36 \times \left(\frac{1}{6}\right)$ (4.8)

Este parâmetro permite calcular a probabilidade de arranque simultâneo destas quatro viaturas, durante o trajeto ascendente.

Por aplicação da equação (4.3) a probabilidade de ocorrência é dada por:

$$P_{sistema} [N(t) = k] = \frac{e^{-7,36 \times \frac{1}{6}} \cdot (7,36 \times \frac{1}{6})^k}{k!} \quad (4.9)$$

Concretizando para cada valor de k , vamos obter os valores de probabilidade de ocorrência de eventos simultâneos que se podem visualizar na figura (4.3).

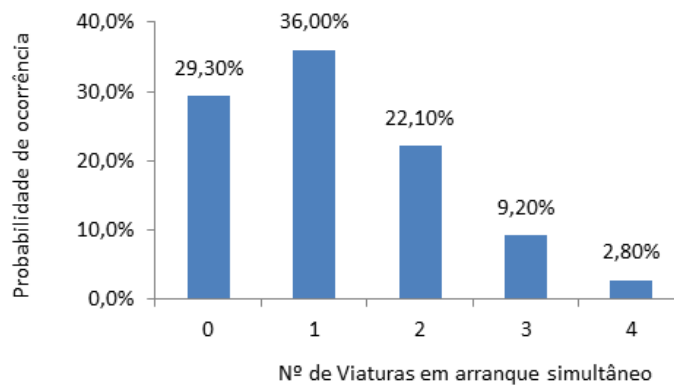


Figura 4.3 – Representação gráfica da probabilidade de ocorrência de eventos simultâneos

Contudo permanece a dúvida se numa situação normal os valores da probabilidade de ocorrência deste evento estão em concordância com estes valores.

Neste sentido, efetuou-se uma monitorização em contexto real de operação, num horário onde a frequência de saída da *Linha nº 4* coincide com as da *Linha nº 103* e que correspondem a uma cadência de 15 minutos.

4.2.5. Monitorização em contexto real de arranque simultâneo

As probabilidades de ocorrência de arranques simultâneos de viaturas troleicarro e de acordo com o anteriormente visto resultam da assunção de que todas as viaturas envolvidas, no pior

cenário apresentado, ou seja com quatro viaturas em trajeto ascendente, param em todos as situações passíveis de paragem e de onde resultam consequentemente os arranques descritos.

Neste sentido efetuou-se um exercício simples, que mais não é do que monitorizar, num dos períodos do horário da *Linha n.º 103* onde coexistam partidas com a *Linha n.º 4* e contabilizar os arranques verificados nas quatro viaturas troleicarro que se encontram em trajeto ascendente, ou seja em duas viaturas das *Linha n.º 4* e duas da *Linha n.º 103*.

Daqui, será possível determinar o parâmetro λ de cada uma das viaturas e consequentemente o parâmetro do sistema $\lambda_{sistema}$, para o conjunto de todas as viaturas monitorizadas.

Com este dado e por aplicação da equação (4.3), chegar-se-á a um modelo de probabilidade muito próximo do arranque simultâneo das viaturas troleicarro em operação real.

Com esta análise pretende-se comparar a análise feita num contexto de exigência máxima (consequentemente do arranque), com a realidade verificada em contexto de operação real.

4.2.5.1. Metodologia de Medição

A monitorização dessas viagens foi efetuada com recurso a quatro equipamentos móveis do tipo *smartphone*, sendo que três deles são equipamentos da marca *HTC*, modelo *One^S* e o quarto um *Samsung Google Nexus²¹*, (figura 4.4 a) e 4.4 b), respetivamente.



a) b)
Figura 4.4 – a) Smartphone *HTC One^S*
b) Smartphone *Samsung Google Nexus*

O recurso a estes equipamentos resulta das potencialidades que estes presentemente revelam e onde se inclui a incorporação de sensores giroscópios, antenas GPS interna, sensores *G* (acelerómetro) e bússolas digitais.

Para além destas potencialidades, estes equipamentos permitem ainda utilizar diversas aplicações (vulgarmente designadas por *App²²*). Estas aplicações podem já vir instaladas no

²¹ As características técnicas destes equipamentos podem ser consultados em http://www.gsmarena.com/htc_one_s-4574.php e em http://www.gsmarena.com/samsung_google_nexus_s-3620.php.

²² *App* – (Aplicativo mobile) – É um software desenvolvido para ser instalado no dispositivo eletrónico móvel. Este aplicativo pode ser instalado no dispositivo, desde que este o permita, por meio de download efetuado pelo usuário via loja on-line,

equipamento, ou caso não venham, existe a possibilidade de estas serem instaladas por meio de download da rede web.

Neste contexto e para auxiliar o nosso processo de monitorização, socorremo-nos de uma aplicação mobile, disponível para download no site [<http://www.sports-tracker.com>]²³.

Esta aplicação está disponível para vários sistemas operativos móveis tais como *Android*, *IOS*, (entre outros) e permite efetuar *online* o armazenamento de coordenadas georreferenciadas (*GPS*), velocidades média, máxima, instantânea, a cota altimétrica, hora e o tempo gasto a percorrer um determinado percurso.

Previamente todos os equipamentos foram sincronizados com a mesma hora. Isto permitiu o armazenamento de todos os dados gerados e que resultaram na gravação *online* de um ficheiro em formato *.gpx que posteriormente pôde ser acedido através do seu *download*.

Posteriormente, os ficheiros gerados foram carregados num site de topografia [<http://www.topografix.com>]. Este processo permitiu corrigir pequenos desvios dos dados gravados referentes aos valores topográficos, gravados nesse ficheiro. Estes pequenos desvios advêm de perda temporária do sinal de GPS. O ficheiro posteriormente gerado, também este em formato *.gpx, foi convertido noutro, em formato *.csv, compatível com o programa da Microsoft Office, *Excel*, com a ajuda do programa *Matlab*²⁴.

Esta foi a metodologia seguida para gravar e posteriormente aceder ao ficheiro com os dados e que permitiu traçar os gráficos referentes a estas monitorizações efetuadas e que se analisam na secção 4.2.5.2.

Um outro fato importante foi ter-se constatado que a cota altimétrica medida pelos equipamentos está muito próxima da cota altimétrica real, neste sentido, optou-se por indicar a evolução da velocidade com a cota altimétrica real.

Destes dados é facilmente perceptível e por comparação da planimetria de cada um dos trajetos, apresentado nas secções 3.4.1.1 e 3.4.1.2, qual é a posição das viaturas troleicarro, com o decorrer do tempo medido e qual é a subestação que em cada momento as está a alimentar.

(Google Play ou App Store) ou diretamente do site pretendido. Uma parte dos aplicativos disponíveis é gratuita, enquanto outra é paga.

²³ De acordo com a Revista Proteste nº350 de outubro de 2013 este aplicativo foi o melhor do teste efetuado com outros aplicativos semelhantes, obtendo uma nota de 70% e 65% respetivamente para os sistemas operativos Android e iOS, tendo sido também o aplicativo mais assertivo nas medições efetuadas, com desvios inferiores a 0,2% (iOS) e 0,8% (Android).

²⁴ *Matlab* (MATrix LABoratory) é um software interativo de alta performance voltado para o cálculo numérico. O MATLAB integra análise numérica, cálculo com matrizes, processamento de sinais e construção de gráficos em ambiente fácil de usar onde problemas e soluções são expressos somente na sua forma matemática, ao contrário da programação tradicional. Este programa é um sistema interativo cujo elemento básico de informação é uma matriz que não requer dimensionamento. Esse sistema permite a resolução de muitos problemas numéricos em apenas uma pequena fração do tempo que se gastaria para escrever um programa semelhante em linguagem Fortran, Basic ou C. Além disso, as soluções dos problemas são expressas quase exatamente como elas são escritas matematicamente.

4.2.5.2. Medição da situação real

Com este exercício, pretende-se perceber se numa operação real, é possível validar a modelização matemática apresentada na secção 4.4.3.

Neste sentido foi considerado como um evento de paragem situações em que a velocidade instantânea desce abaixo dos 5km/h, sendo, no instante seguinte, precedida por um incremento no valor dessa mesma velocidade. Em termos de representação gráfica, esta velocidade é representada a cor verde nos gráficos seguintes.

O tempo de percurso indicado é o tempo que cada uma das linhas se encontra alimentada pela subestação de Montarroio, entre a partida da *Estação Nova* e a chegada ao local onde o percurso passa a ser alimentado pela subestação do Calhabé. Do mesmo modo do que na análise estatística só foi considerado o trajeto ascendente.

Nas figuras seguintes (figura (4.5) e figura (4.7)), podem ser visualizadas as representações gráficas individuais da evolução da velocidade instantânea, em função da cota altimétrica do respetivo percurso, efetuadas em cada uma das viaturas monitorizadas.

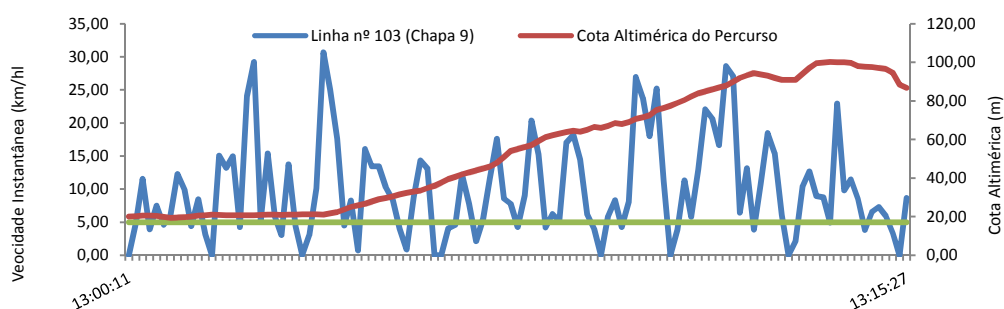


Figura 4.5 – Representação gráfica da evolução da velocidade instantânea da viatura troleicarro em operação na *Linha nº 103* com chapa 9 no respetivo trajeto e os seus arranques

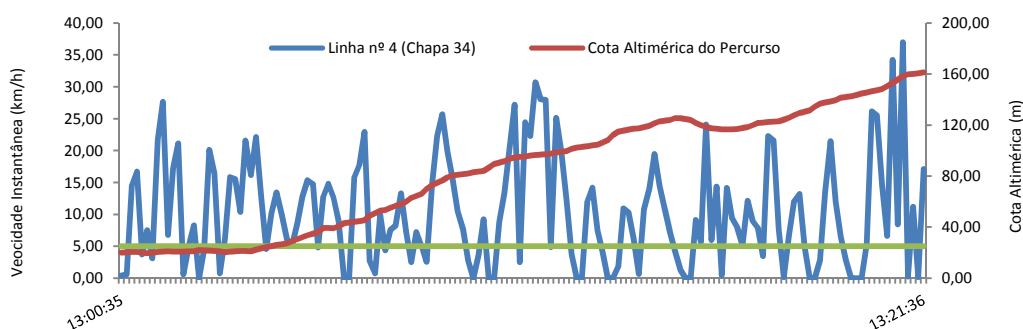


Figura 4.6 – Representação gráfica da evolução da velocidade instantânea da viatura troleicarro em operação na *Linha nº 4* com chapa 34 no respetivo trajeto e os seus arranques.

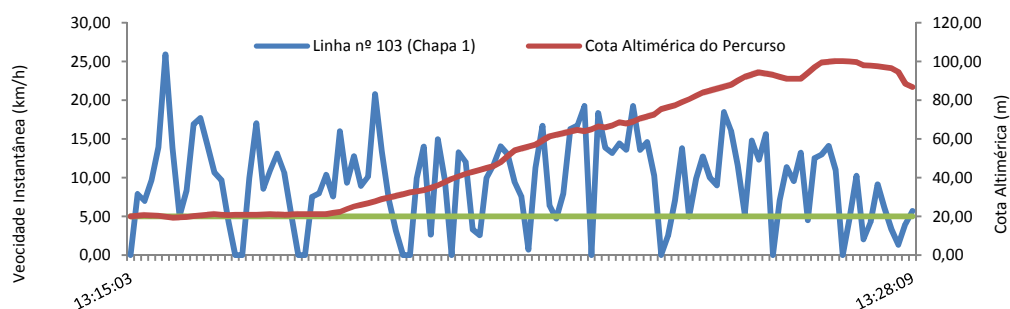


Figura 4.7 – Representação gráfica da evolução da velocidade instantânea da viatura troleicarro em operação na *Linha nº 103* com chapa 1 no respetivo trajeto e os seus arranques

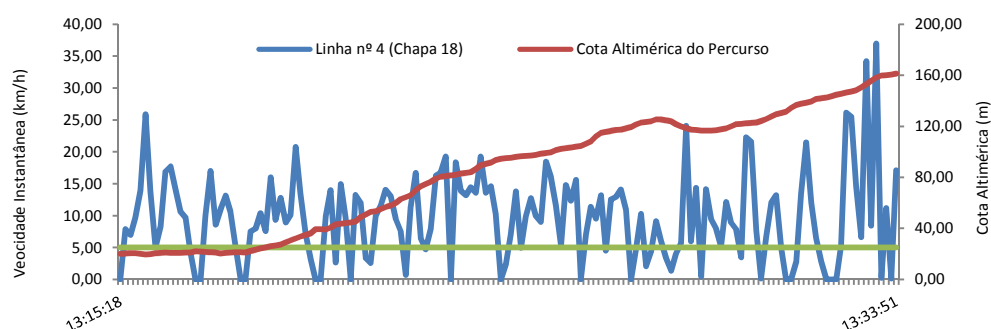


Figura 4.8 – Representação gráfica da evolução da velocidade instantânea da viatura troleicarro em operação na *Linha nº 4* com chapa 18 no respetivo trajeto e os seus arranques

O horário escolhido foi o período com partidas previstas entre as 13h00m e as 13h15m. As partidas deste horário estão assim programadas;

- *Linha nº4* - Viatura com chapa 34 – partida programada às 13h00m
- Viatura com chapa 18 - partida programada às 13h15m
- *Linha nº103* - Viatura com chapa 9 – partida programada às 13h00m
- Viatura com chapa 1 - partida programada às 13h15m

O número de viaturas em operação, considerando intervalos de 5 minutos é o seguinte;

Entre as 13h00m e as 13h05m – duas viaturas;

- Entre as 13h05m e as 13h10m - duas viaturas;
- Entre as 13h10m e as 13h15m – duas viaturas;
- Entre as 13h15m e as 13h20m – quatro viaturas (durante um curto espaço de tempo, que se pode estimar entre 1 a 5 minutos);
- Entre as 13h20m e as 13h25m – três viaturas;

- Entre as 13h25m e as 13h30m – duas viaturas.

Daqui se conclui, que em meia hora de operação o sistema opera com o seguinte número de viaturas em percurso ascendente e em operação conjunta:

- Duas viaturas – durante cerca de 20 minutos;
- Três viaturas – durante cerca de 5 minutos;
- Quatro viaturas – durante cerca de 5 minutos (no máximo, em operação normal).

O cálculo do parâmetro λ para cada uma das viaturas monitorizadas é dado do seguinte modo:

- Para a *Linha nº 103* – Chapa 9,

Hora de Partida (real)	Hora de Chegada ²⁵ (real)	Tempo decorrido - Δt (minutos)	Ocorrência de arranques (O_a)	$\lambda = \frac{O_a}{\Delta t}$
13:00:11	13:15:27	00:15:16	23	1,51

- Para a *Linha nº 4* – Chapa 34,

Hora de Partida (real)	Hora de Chegada (real)	Tempo decorrido - Δt (minutos)	Ocorrência de arranques (O_a)	$\lambda = \frac{O_a}{\Delta t}$
13:00:35	13:21:36	00:20:50	29	1,39

- Para a *Linha nº 103* – Chapa 1,

Hora de Partida (real)	Hora de Chegada (real)	Tempo decorrido - Δt (minutos)	Ocorrência de arranques (O_a)	$\lambda = \frac{O_a}{\Delta t}$
13:15:03	13:28:09	00:13:06	19	1,45

- Para a *Linha nº 103* – Chapa 18,

Hora de Partida (real)	Hora de Chegada (*) (real)	Tempo decorrido - Δt (minutos)	Ocorrência de arranques (O_a)	$\lambda = \frac{O_a}{\Delta t}$
13:15:18	13:33:51	18:33m	23	1,24

²⁵ Passagem aos Arcos-do-Jardim

Analogamente ao efetuado na secção 4.2.4 e por aplicação da equação (4.4) pode-se determinar o parâmetro $\lambda_{sistema}$. Este parâmetro é dado pela soma de cada um dos parâmetros λ individuais e que resultaram da monitorização efetuada em cada uma das viaturas. Assim têm-se:

$$\lambda_{sistema} = \lambda_4 + \lambda_{103} + \lambda_4 + \lambda_{103} \Leftrightarrow \lambda_{sistema} = 1,51 + 1,39 + 1,45 + 1,24 \Leftrightarrow \lambda_{sistema} = 5,59 \quad (4.10)$$

Considerando o mesmo tempo de arranque ($t = \frac{1}{6}$ de minuto) e por aplicação da equação (4.8), parâmetro λt é dado por:

$$\lambda t = \lambda_{sistema} \times t \Leftrightarrow \lambda t = 5,59 \times \left(\frac{1}{6}\right) \quad (4.11)$$

Por aplicação da equação (4.3) a probabilidade de ocorrências associada a este método e que resulta dos dados apurados da monitorização efetuada, são dados por:

$$P_{sistema} [N(t) = k] = \frac{e^{-5,59 \times \frac{1}{6}} \cdot (5,59 \times \frac{1}{6})^k}{k!} \quad (4.12)$$

A concretização para cada valor de k , em comparação com o modelo estatístico apresentado na secção 4.2.3, encontra-se representada na figura seguinte (Figura 4.9).

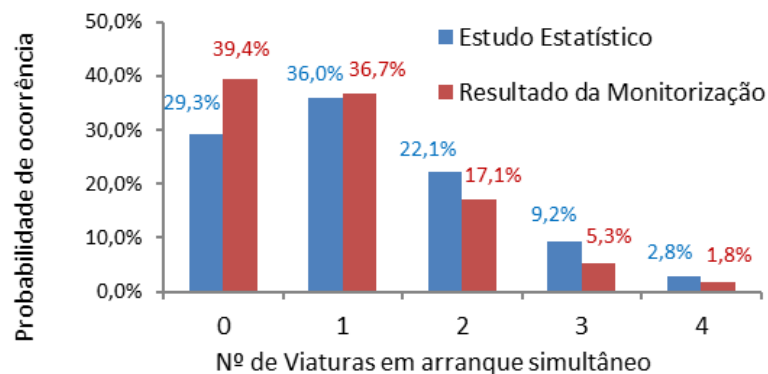


Figura 4.9 – Comparação entre as probabilidades de ocorrência de eventos simultâneos (em %) evidenciadas no Estudo Estatístico versus Resultado da Monitorização efetuada.

Apesar de o número de medições efetuadas na monitorização ser diminuto, conseguiu-se desde já obter resultados que se podem considerar dentro do expectável, entre a abordagem teórica e a verificada em contexto real. A evolução do sistema matemático revela uma aproximação bastante convergente com as medições efetuadas.

Comprova-se que em contexto real a probabilidade da não ocorrência de qualquer evento de arranque ou de este acontecer em apenas uma única máquina é mais elevado do que no estimado pelo estudo estatístico apresentado. Em sentido contrário e para a ocorrência de eventos simultâneos, para um número de viaturas superior ou igual a duas, o resultado apresentado pela monitorização é mais baixo, do que o previsto pelo estudo estatístico, revelando-se este mais conservador.

Esta questão é resultado de na prática, ocorrerem em regime de funcionamento normal, menos ocorrências de paragem do que na abordagem estatística efetuada. Nessa abordagem estatística teve-se em atenção e consideração a situação mais desfavorável e exigente na operação de cada um das linhas, acrescido ao fato desta operação ocorrer em intervalos de tempo, (frequência de saída) das viaturas troleicarro da *Linha nº 103* de 15 minutos, o que não acontece em todas as partidas.

Desta monitorização, constatou-se que o tempo de operação conjunta, em particular no que concerne a três e a quatro viaturas, foi a seguinte:

- Três viaturas – operação conjunta de 1 minuto e 36 segundos.
- Quatro viaturas – operação conjunta de apenas 9 segundos.

4.3. Medições Efetuados nas Subestações

A análise de sistemas elétricos não se pode ficar apenas por uma análise transitória. Para um completo conhecimento de qualquer sistema elétrico é necessário proceder à recolha das suas grandezas mais importantes, com intervalos de tempo maiores. Esta análise é vulgarmente efetuada pelos analisadores de energia. É neste contexto que esta secção 4.3 se desenvolve.

Hoje em dia encontram-se no mercado uma grande variedade de equipamentos vocacionados para a medição e diagnóstico de grandezas elétricas existentes nas redes de energia. Estes equipamentos de uma forma genérica permitem medir a frequência da alimentação da instalação, o consumo das correntes e valores das respetivas tensões, quer de fase, quer compostas, identificando no caso das correntes, desequilíbrios no consumo da carga.

Com estas medições e através de algoritmos matemáticos, estes equipamentos têm a capacidade de calcular o fator de potência da instalação, incluindo o deslocamento de fases (e consequentemente a respetiva tangente), a taxa de distorção harmónica (*THD*), para a corrente e para a tensão e as potências (ativa, aparente e reativa). Paralelamente existe ainda a

possibilidade de serem utilizados como osciloscópios, para visualização das formas de onda, como por exemplo, das tensões e correntes envolvidas.

Estes equipamentos são dotados ainda de memória interna, para registo das grandezas lidas e calculadas, permitindo posteriormente, através de *software* desenvolvido pela marca destes equipamentos, o download do ficheiro gerado e que de uma forma geral é editável através do programa da *Microsoft Office, Excel*, por meio de uma porta RS232 ou USB, que variam consoante a marca e o modelo.

4.3.1. Características dos Equipamentos de Medição utilizados

O equipamento de monitorização utilizado, foi o analisador de redes elétricas da *Chauvin Arnoux-QualiSTAR CA 8334B*, apresentado na figura 4.10.



Figura 4.10 – Equipamento Analisador da *Chauvin Arnoux C.A.8334B*

Este analisador de redes elétricas tem uma memória interna para gravação de dados de 2MB e permite a medição das seguintes grandezas mais significativas²⁶;

- Medição de frequência da tensão da instalação (de 40 a 69 Hz);
- Medição de potências (W, VA, var);
- Medição do fator de potência e da respetiva tangente;
- Taxa de distorção harmónica (THD) (até à 50ª ordem);

²⁶ Disponível em <http://www.chauvin-arnoux.com/catalogues/catalogues.asp>

Para se efetuar estas medições, cada analisador é composto ainda pelos seguintes equipamentos auxiliares de medição:

- 4 Pinças de tensão até 960 V; (de 6 a 960V fase-fase e de 6 a 480V fase-neutro)
- 3 Pinças de corrente MN93A: (0,005 A_{AC} a 5 A_{AC} / 0,1 A_{AC} a 120 A_{AC})



Figura 4.11 – Pinça de medição de correntes AC – ref^a. MN93A

O equipamento permite que se efetuem quaisquer tipos de medições, independentemente do tipo de conexão da instalação podendo a instalação elétrica ser monofásica, bifásica, trifásica, com ou sem neutro, em estrela ou em triângulo. Os algoritmos de cálculo utilizado por este equipamento estão descritos no Anexo 2.

4.3.2. Metodologia

As subestações de retificação são alimentadas em média tensão, conforme já apresentado, sendo a alimentação de Montarroio efetuada a 6 kV e do Calhabé a 15 kV. Deste modo e de uma forma direta, tornava-se impossível proceder às medições necessárias. Por conseguinte, socorremo-nos dos quadros, onde se encontram instalados os sistemas de contagem do comercializador de energia.

Nestes quadros temos disponíveis as respetivas tensões e correntes de fase, de cada uma das instalações. Estas tensões e correntes relacionam-se com as originais por meio de uma razão de transformação resultante dos transformadores de medidas (tensão e correntes) existentes na instalação²⁷. Contudo nos acessórios que tínhamos disponíveis, para esta monitorização, mais concretamente as pinças amperimétricas, não permitiam efetuar a medição de correntes contínuas (I_{DC}).

²⁷ A instalação de contagem da subestação de Montarroio tem as seguintes relações de transformação;

- i) Transformadores de tensão (TT) 6000/110 V
- ii) Transformadores de corrente (TI) 200/5A

A instalação de contagem da subestação do Calhabé tem as seguintes relações de transformação;

- i) Transformadores de tensão (TT) 15000/100V
- ii) Transformadores de corrente (TI) 50/5A

Deste modo, foi delineado uma estratégia que permitisse efetuar esta medição. Neste sentido, recorreremos a uma pinça amperimétrica²⁸, existente no *Laboratório de Acionamentos Eletromecânicos*, do *Departamento de Engenharia Eletrotécnica*, do *Instituto Superior de Engenharia de Coimbra*, que nos permite medir intensidades (em corrente alternada – AC – ou corrente contínua – DC –) com a consequente geração de sinal em tensão.

Esta pinça mede até 2 000 A (AC ou DC), gerando uma diferença de potencial com uma relação de 1 A/1 mV (AC ou DC) e pode ser visualizada nas figuras (4.12 a) e (4.12 b)).



Figura 4.12 – a) Pinça de medição utilizada para medição de corrente AC ou DC
b) Relação de medição de 1 A / 1mV até um máximo de 2 000A

Este valor, não deixa de ser um valor pequeno e fora da escala de leitura do aparelho que no caso de tensão, recorde-se têm a capacidade de receber diferenças de potencial entre 6 e 960 V (AC ou DC).

Face a este requisito, dimensionou-se um amplificador operacional somador, não inversor que, neste caso, vai amplificar o valor de tensão gerado pela leitura da pinça amperimétrica, transformando este sinal num sinal que possa ser lido pelo aparelho de monitorização.

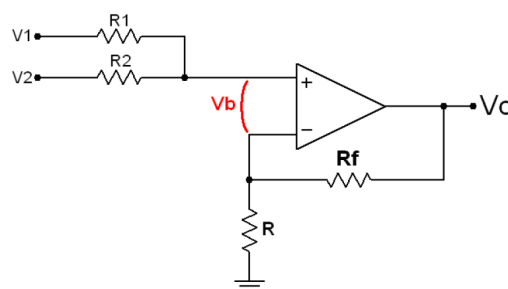


Figura 4.13 – Amplificador somador não inversor de duas entradas

As equações de funcionamento, deste tipo de amplificador, são dadas pelas duas seguintes equações:

²⁸ Foi utilizada uma pinça de medição por cada subestação, uma para Montarroio e outra para Calhabé.

$$V0 = \left(1 + \frac{R_f}{R}\right) \cdot Vb \quad (4.38)$$

$$Vb = \left(\frac{\frac{Vdc}{R_1} + \frac{Vcte}{R_2}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} \right) \quad (4.39)$$

A diferença de potencial $V1$ é a tensão gerada pela pinça amperimétrica decorrente da medição efetuada e a diferença de potencial $V2$ é a tensão de uma fonte de alimentação exterior, de forma a gerar um valor de offset que se possa enquadrar na escala de leitura do equipamento de monitorização. Neste caso concreto, para a diferença de potencial $V2$ foi utilizado um valor de 0,5V e que se denominou, daqui por diante como V^{cte} .

Deste modo pretende-se que:

- Quando a tensão $V1=0$ V (não existe passagem de corrente na pinça amperimétrica) o valor de $V0=6$ V.
- Quando a tensão $V1=2$ V (a corrente na pinça amperimétrica atinge os 2 000 A) o valor de $V0=30$ V.

Com estes pressupostos, teoricamente, a escala de saída do valor de tensão $V0$, era de 6 V a 30V, correspondendo respetivamente a uma corrente lida entre 0 a 2000 A.

Contudo verificamos que a corrente máxima fornecida pelas subestações não seria de 2 000 A. Com base em faturas de energia disponibilizadas pelos SMTUC, estimou-se que o consumo das subestações andaria, no máximo, na ordem dos 1500A para o caso da subestação de Montarroio e dos 750A no caso da subestação do Calhabé.

Partindo então destes valores procedeu-se ao dimensionamento dos amplificadores utilizados, primeiramente sob o ponto de vista teórico e partindo deste estudo, chegou-se à sua implementação. De forma a termos a possibilidade de ajuste, optou-se por utilizar um potenciómetro para ajustar o valor da resistência R .

O valor da corrente medida, por unidade de tensão gerada é dado por:

$$I_{medido} = \frac{I_{max}}{(V0_{Max} - V0_{Min})} \quad (4.40)$$

Em que I_{max} considerado é respetivamente de 1500 A para subestação de Montarroio e 750 A para a subestação do Calhabé, pelas razões já explanadas.

4.3.2.1. Dimensionamento Teórico dos Ampops

Face aos requisitos apresentados, foram dimensionados dois amplificadores operacionais semelhantes, um para cada subestação e com o ajuste dos valores das suas resistências ao consumo que cada uma apresenta e com os seguintes valores:

- Subestação de Montarroio
 - $R_1=R_2= 1k\Omega$
 - $R_f= 29 k\Omega$
 - $R=1k\Omega$
- Subestação do Calhabé
 - $R_1=R_2= 1k\Omega$
 - $R_f= 29 k\Omega$
 - $R=0,75k\Omega$

Com esta solução, por aplicação das equações (4.13) e (4.14) os valores de V_0 e V_b variam dentro dos valores apresentados nas tabelas seguintes (tabela (4.1) e tabela (4.1), respetivamente para a subestação de Montarroio e do Calhabé.

Tabela 4.1 – Valores de V_0 e V_b teóricos para *AMPOP* da subestação de Montarroio ($V^{cte}=0.5 V$)

$V_0 (V)$		$V_b (V)$	
Min	Max	Min	Max
7,5 V	30 V	0,25V	1 V

Tabela 4.2 – Valores de V_0 e V_b teóricos para o *AMPOP* da subestação do Calhabé ($V^{cte}=0.5 V$)

$V_0 (V)$		$V_b (V)$	
Min	Max	Min	Max
9,9 V	29,75 V	0,25V	0,6 V

4.3.2.2. Dimensionamento Prático dos Ampops

O dimensionamento prático²⁹ foi efetuado com base nas resistências disponíveis no laboratório. O valor das resistências utilizadas na implementação do *AMPOP* a utilizar na subestação de Montarroio foram as seguintes³⁰;

²⁹ O *AMPOP* utilizado foi o LM358-N. Este equipamento requer uma alimentação de +3 V a +32 V.

- *AMPOP* para a subestação de Montarroio

- $R_1 = 1,05 \text{ k}\Omega$
- $R_2 = 1,07 \text{ k}\Omega$
- $R_f = 29,75 \text{ k}\Omega$
- $R = 0,99 \text{ k}\Omega$

A variação dos valores de V_0 e V_b neste equipamento e por aplicação das equações (4.38) e (4.39) podem ser consultados na tabela seguinte (Tabela 4.3).

Tabela 4.3 – Valores de V_0 e V_b reais referentes ao *AMPOP* da subestação do Montarroio ($V^{cte} = 0.5 \text{ V}$)

$V_0 \text{ (V)}$		$V_b \text{ (V)}$	
Min	Max	Min	Max
6,6	27,55	0,22	0,89

Por aplicação da equação (4.40), o valor da corrente medida, por unidade de tensão “lida” no equipamento de medição, é dado por:

$$I_{medido} = \frac{1500}{(27,55 - 6,6)} = 71,59 \text{ A (por cada valor unitário de tensão medida)} \quad (4.41)$$

No que concerne ao *AMPOP* implementado para a subestação do Calhabé, as resistências disponíveis no laboratório e utilizadas, foram as seguintes:

- *AMPOP* para a subestação do Calhabé

- $R_1 = 1,06 \text{ k}\Omega$
- $R_2 = 1,03 \text{ k}\Omega$
- $R_f = 29,15 \text{ k}\Omega$
- $R = 0,68 \text{ k}\Omega$

A variação dos valores de V_0 e V_b neste equipamento e por aplicação das equações (4.38) e (4.39) podem ser consultados na tabela (4.4).

³⁰ Estes valores resultam de medição efetuada por ohmímetro existente no Laboratório de Acionamentos Eletromecânicos do Departamento de Engenharia Eletrotécnica do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra.

Tabela 4.4 – Valores de V_0 e V_b reais referentes ao AMPOP da subestação do Calhabé ($V^{cte}=0,5V$)

V_0		V_b	
Min	Max	Min	Max
10,13	24,91	0,23	0,57

Analogamente ao efetuado para a subestação de Montarroio, por aplicação da equação (4.40), o valor da corrente medida, nesta subestação por unidade de tensão “lida” no equipamento de medição, é dado por:

$$I_{medido} = \frac{750}{(24,29 - 10,13)} = 47,36 \text{ A (por cada valor unitário de tensão medida)} \quad (4.42)$$

No tratamento de dados, para calcular o valor da corrente contínua (I_{DC}) para cada uma das subestações, utilizou-se a equação (4.43):

$$I_{DC} = (V_0 - V_{0_{min}}) \times I_{medido} \quad (4.43)$$

Os equipamentos dimensionados e de medição foram ligados de acordo com a figura seguinte, utilizando um canal de tensão do analisador de rede, monitorizando diretamente noutro canal a tensão contínua V_{DC} .

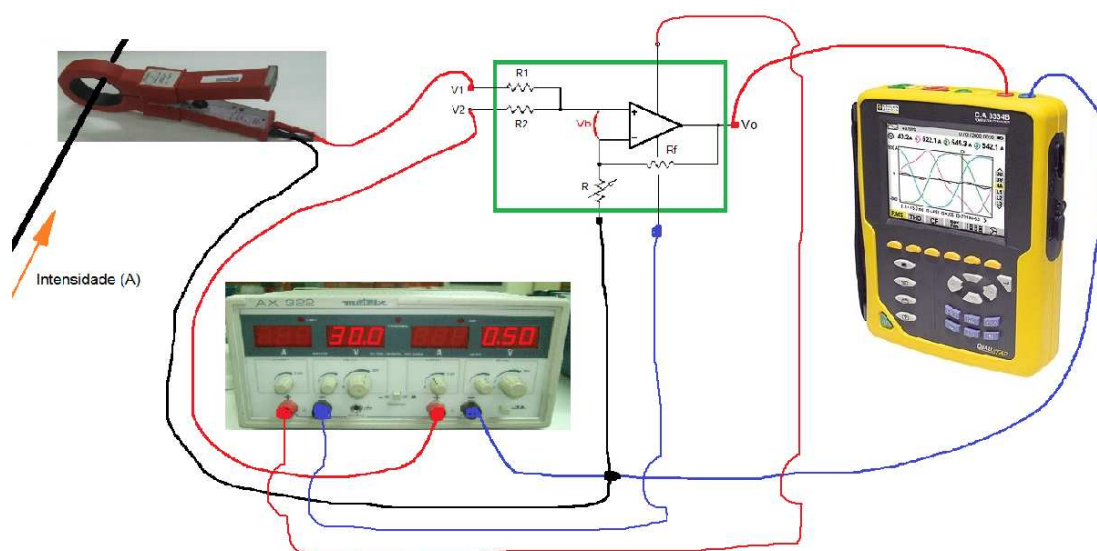


Figura 4.14 – Exemplificação esquemática da ligação dos equipamentos

4.3.3. Medições

4.3.3.1. Medição do lado AC

As medições do lado AC, foram efetuadas no quadro do comercializador de energia, conforme referido anteriormente. Após a ligação dos equipamentos de monitorização, procedeu-se à seleção do tipo de instalação que se pretende monitorizar (monofásica, trifásica com ou sem neutro, etc..), bem como à introdução das referências dos equipamentos de medição utilizados, pinças, tendo em atenção as suas gamas de medição.

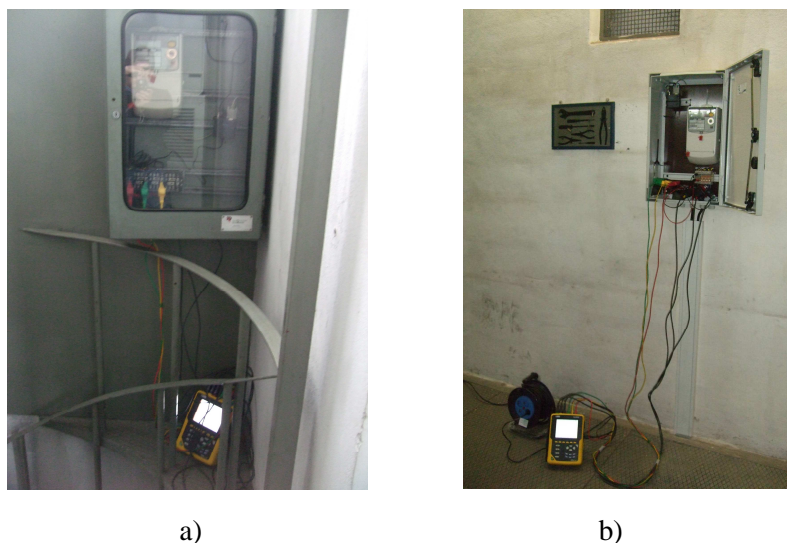


Figura 4.15 – a) Medição do Lado AC na Subestação de Montarroio
b) Medição do Lado AC na Subestação do Calhabé

A programação do equipamento teve por base a seleção das grandezas que se pretendem medir, onde se inclui as tensões, correntes, potência ativa, reativa, aparente, o tempo de integração e a taxa de distorção harmónica bem como o acerto de hora, para que todos os equipamentos estejam sincronizados. Optou-se por um tempo de integração de 15 minutos e um registo até à 25ª harmónica.

Foi também utilizado um equipamento que media a tensão e a corrente de entrada, por cada instalação.

4.3.2.2. Medição do lado DC

No lado DC foi utilizado, por instalação, um equipamento que nos permitiu registar os valores de tensão do barramento DC e da corrente consumida.

No entanto esta medição de corrente será efetuada por meio da estratégia implementada para o efeito, ou seja por força da necessidade de introdução do *AMPOP*, o equipamento de monitorização vai medir um valor de tensão gerado por este e lido pelo equipamento de

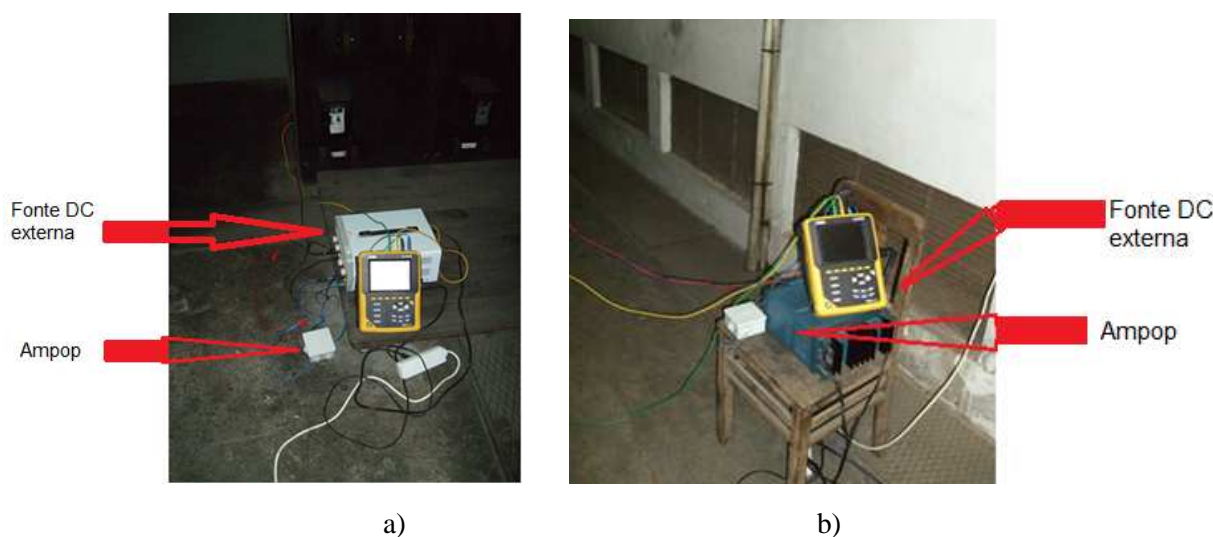
monitorização. Posteriormente o valor de tensão lido será “transformado” num valor de corrente, por meio da escala que indicámos anteriormente (secção 4.3.2.2.).

O valor unitário de tensão medida pelos equipamentos de monitorização, corresponde respetivamente para a subestação de Montarroio 71,59 A, e de 47,36 A para a subestação do Calhabé, ou seja:

- Subestação de Montarroio $1V_{DC}$ corresponde a 71,59 A.
- Subestação de Montarroio $1V_{DC}$ corresponde a 47,36 A.

Com base nestes valores, traçaram-se as curvas da potência DC que se indicam na secção 4.4.

A figura (4.16) mostra a monitorização dos equipamentos, no lado DC, nas respetivas subestações.



a)
b)
Figura 4.16 – a) Medição do Lado DC na Subestação de Montarroio
b) Medição do Lado DC na Subestação do Calhabé

Para efeitos de medição, os equipamentos foram instalados no dia 02/05/2012 (Quarta-Feira), tendo começado a gravação e registo das medições pelas 12h15m até ao dia 11/05/2012 (Sexta-Feira) às 10h00m.

4.4. Resultados Obtidos na Monitorização das Subestações

Os dados obtidos pela monitorização, foram posteriormente descarregados para um PC onde depois de selecionados e tratados. Desta análise, resultaram os gráficos traçados respetivamente na secção 4.4.1, para a subestação de Montarroio e na secção 4.4.2, para a subestação do Calhabé.

Os gráficos gerados foram traçados para cada um dos dias monitorizados. Neles são traçadas as potências medidas, nomeadamente a potência ativa (P), potência aparente (S), resultado da medição efetuada no lado AC e potência de saída (P_{dc}), resultado da medição efetuada no lado AC.

Foram também analisados, os parâmetros de eficiência de cada uma das instalações, como é o caso da distorção harmónica, o rendimento e o fator de potência.

4.4.1. Apresentação de Resultados da Monitorização na Subestação de Montarroio

Nesta seção são apresentadas as medições efetuadas durante o período de monitorização, das potências medidas, para cada um dos dias monitorizados bem como dos parâmetros de eficiência indicados, efetuados para o dia em que foram verificados maiores consumos.

4.4.1.1 Potências Medidas (DC, Ativa e Aparente)

- Quinta-Feira 03/05/2012

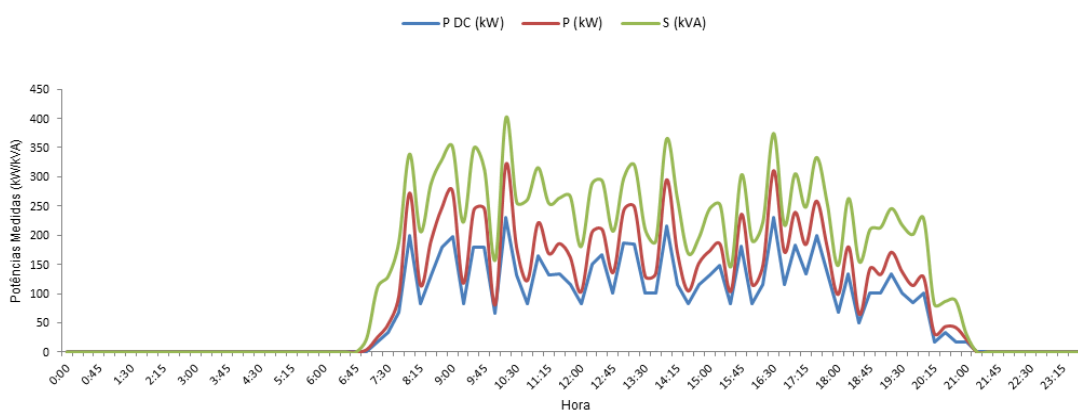


Figura 4.17 – Valores medidos no dia 03/05/2012- quinta-feira

- Sexta-Feira 04/05/2012

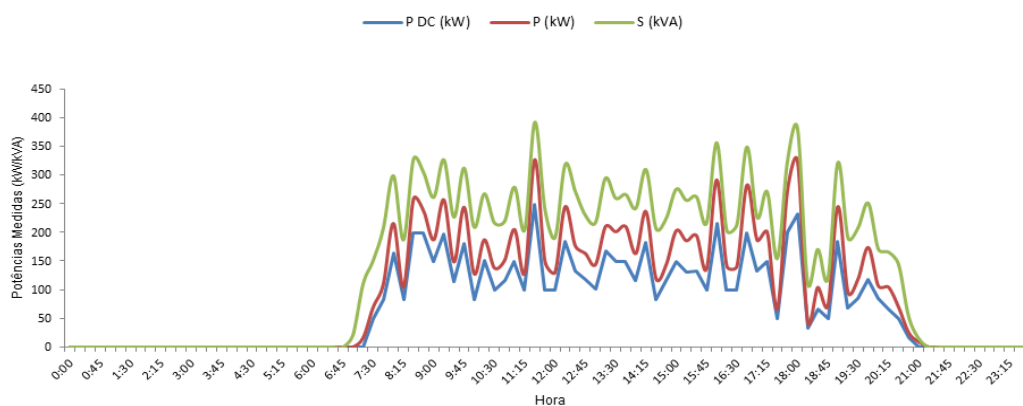


Figura 4.18 – Valores medidos no dia 04/05/2012- sexta-feira

- Segunda-feira 07/05/2012

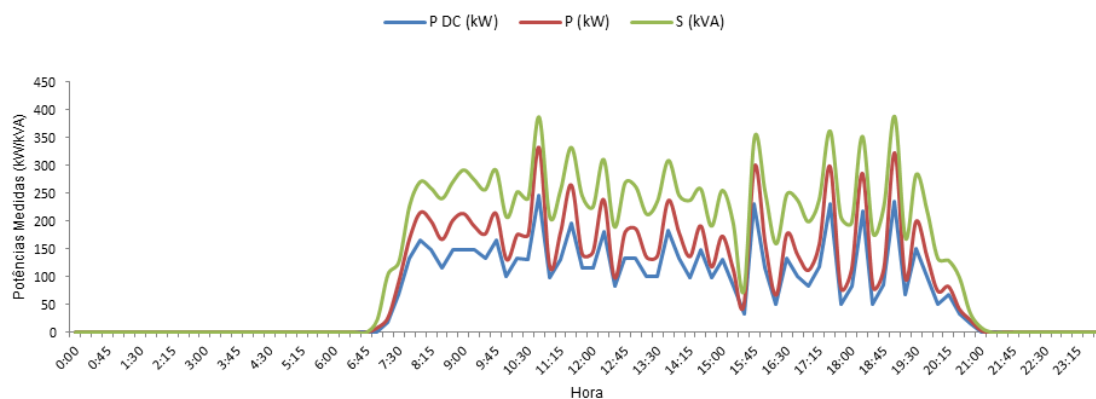


Figura 4.19 – Valores medidos no dia 07/05/2012- segunda-feira

- Terça-feira 08/05/2012

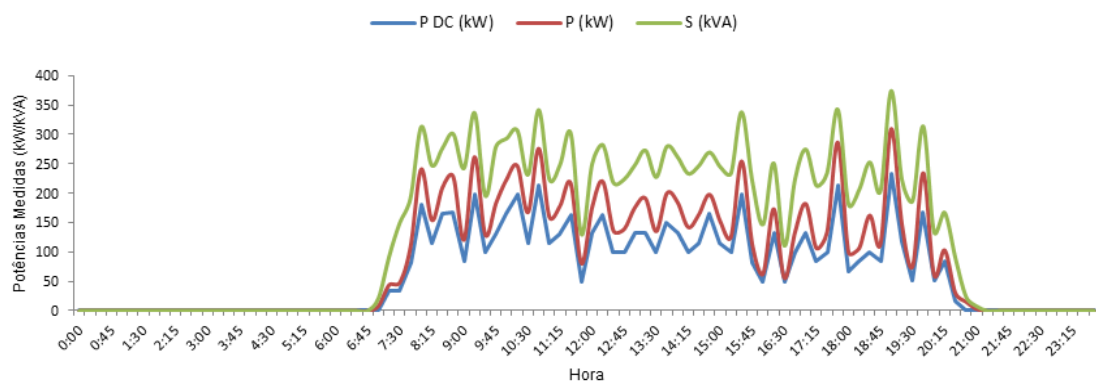


Figura 4.20 – Valores medidos no dia 08/05/2012- terça-feira

- Quarta-feira 09/05/2012

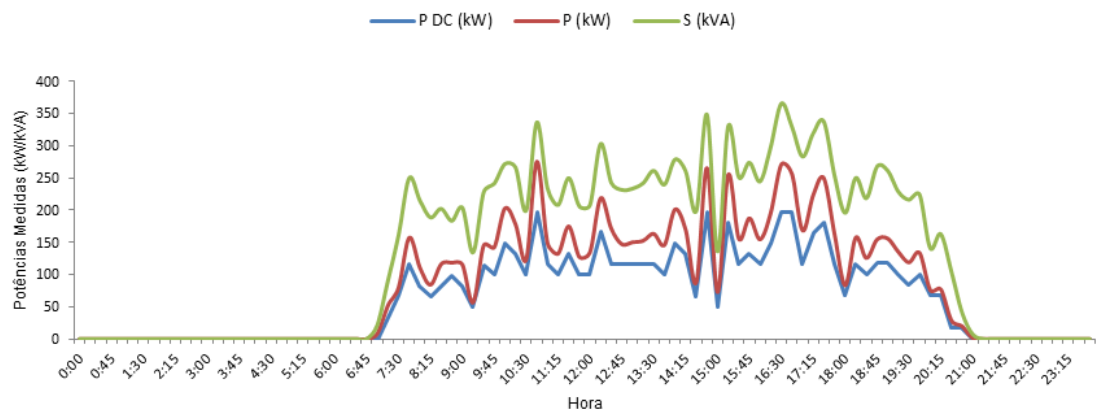


Figura 4.21 – Valores medidos no dia 09/05/2012- quarta-feira

- Quinta-feira 10/05/2012

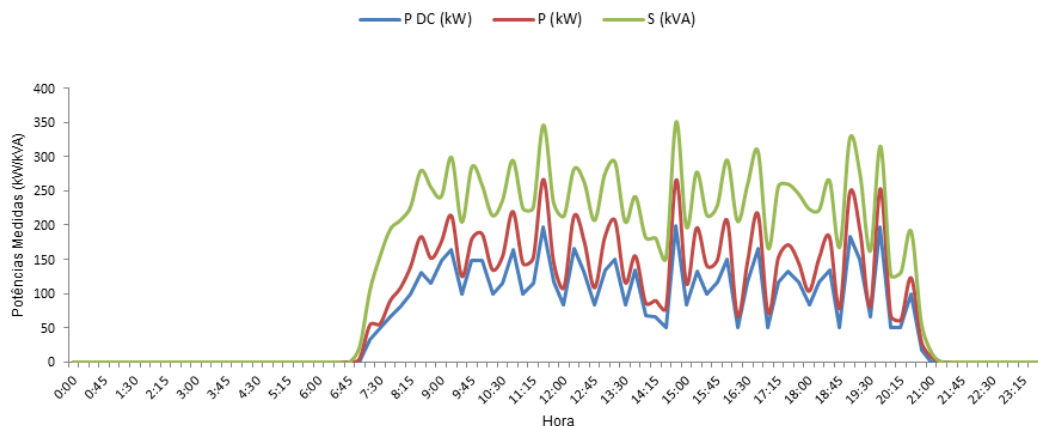


Figura 4.22 – Valores medidos no dia 10/05/2012- quinta-feira

Da análise a estes gráficos, constata-se a diferença significativa nas curvas traçadas, entre a potência aparente (S), identificada nos gráficos a cor verde e a potência ativa (P) identificada a vermelho. Esta diferença é representativa do elevado consumo que esta subestação tem de energia reativa³¹. Obviamente que em termos gráficos quanto maior for esta diferença, maior será a potência reativa (Q).

4.4.1.2 Parâmetros de Eficiência

Os parâmetros de eficiência considerados foram os da *Distorção Harmónica*, e neste contexto foram analisados a Distorção Harmónica da Corrente (THD_i) e a Distorção Harmónica da Tensão (THD_v). Para além destes foram também estudados o Rendimento (η) e Fator de Potência.

- Distorção Harmónica

Para efeitos do estudo da Distorção Harmónica da Corrente (THD_i) e a Distorção Harmónica da Tensão (THD_v), foram consideradas as medições efetuadas durante o dia de segunda-feira 07/05/2012. Esta opção teve por base de ter sido nesse dia que se verificaram consumos na subestação de Montarroio mais elevados, com incidência às 10h45m onde esse consumo foi o mais elevado em todo o período de monitorização.

Esta escolha teve por base a tentativa de representar o funcionamento do sistema o mais aproximadamente possível ao seu funcionamento nominal. A potência ativa requerida foi de 332,52 kW, representando apenas 27,7% da potência do grupo retificador, que recorde-se é de 1200 kW (2 grupos retificadores de 600 kW cada).

³¹ A potência reativa (Q) é dada pela raiz quadrada da diferença entre a potência aparente (S) e a potência ativa (P), ambas ao quadrado, ou seja $Q = \sqrt{S^2 - P^2}$.

○ Distorção Harmónica na Corrente (THD_i);

Após a análise do ficheiro *Excel* gerado pelo equipamento de monitorização, que monitorizou e registou as harmónicas até à 25ª ordem, podemos verificar que, de uma forma geral, o valor do THD_i varia consoante o valor da corrente no mesmo instante, tal como era de esperar.

Para o cálculo do THD_i , foi utilizada a equação (2.6)

$$THD_i = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \left(\frac{I_{c_h}}{I_{c_1}} \right)^2},$$

sendo I_{c_h} o valor eficaz da harmónica de ordem h da corrente e o I_{c_1} o valor fundamental.

Este cálculo foi efetuado pela concretização desta equação até ao 25º harmónico gerado e gravado no ficheiro de monitorização.

Estes dados permitiram ainda registar a evolução do THD_i (em%) ao longo do dia podendo esta ser visualizada no gráfico representado pela figura (4.23).

O valor médio diário do THD_i , foi de 11,59%.

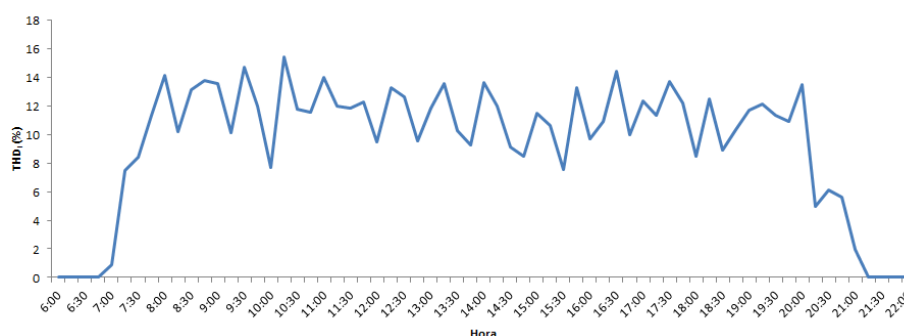


Figura 4.23 – Evolução do THD_i (em %) durante o dia de segunda-feira 07/05/2012

Com base nos valores das componentes harmónica, apresenta-se na figura (4.24) é apresentada a comparação entre o espectro harmónico da subestação de Montarroio, às 10h45m de segunda-feira 07/05/2012 e o espectro harmónico da corrente teórica absorvida por um retificador trifásico de 12 pulsos. [39]

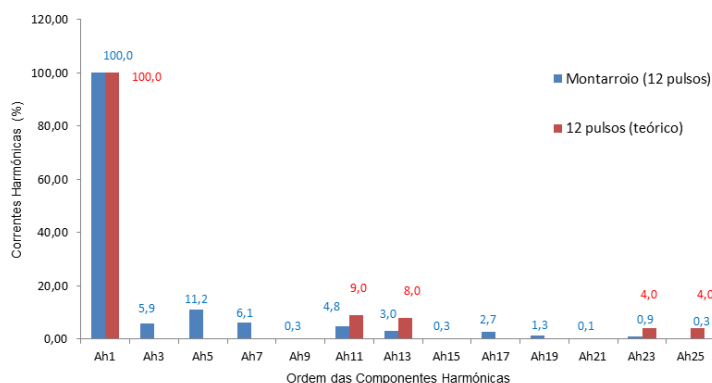


Figura 4.24 – Espectro harmónico às 10h45m de segunda-feira 07/05/2012, em comparação com o espectro harmónico teórico de um retificador de 12 pulsos

Da análise à figura anterior e por comparação das componentes harmónicas que seriam expectáveis de se encontrarem, ou seja a 11^a, 13^a, 23^a e a 25^a, constata-se que as evidenciadas na medição, encontram-se abaixo dos níveis teóricos. Estes valores são justificados pelo fato desta subestação estar a funcionar apenas a pouco mais de 1/4 da sua carga.

Em sentido contrário, foram encontradas componentes harmónicas que sob o ponto de vista teórico não seriam expectáveis de se encontrarem. Com efeito, destacam-se particularmente a 3^a, 5^a, 7^a e a 17^a que conforme se pode visualizar na figura 4.24 apresentam valores significativos, respetivamente de 5,9%, 11,2%, 6,1% e 2,7%.

o Distorção Harmónica na Tensão (THD_v)

O cálculo da Distorção Harmónica na Tensão (THD_v) foi efetuado de acordo com a equação (2.7).

$$THD_v = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \left(\frac{V_{c_h}}{V_{c_1}} \right)^2}$$

Este cálculo foi concretizado até à 25^a ordem gravada no ficheiro de *Excel* da monitorização. Esta evolução que teve por base os dados do dia de segunda-feira 07/05/2012 pode ser visualizada na figura (4.25).

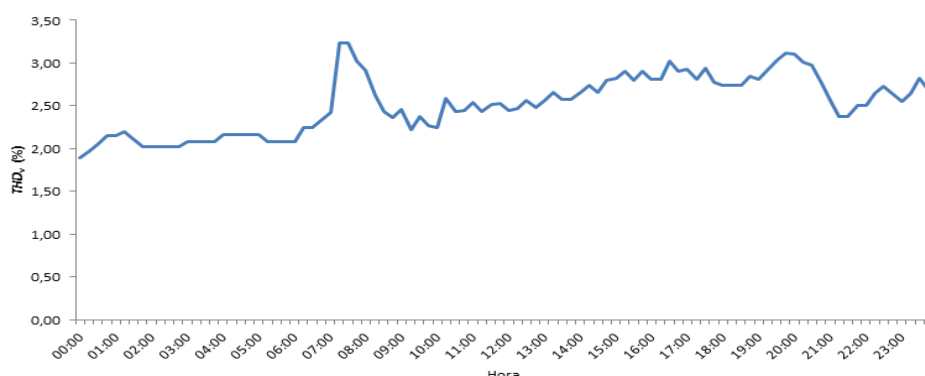


Figura 4.25 – Evolução do TDH_v (em %) durante o dia de segunda-feira 07/05/2012

A distorção harmónica na tensão tem a evolução que se pode visualizar na figura (4.25), apresentando valores mínimos e máximos respetivamente de 1,89% e os 3,24%. A média da distorção harmónica, neste dia, situou-se nos 2,53%.

○ Rendimento (η) e Fator de Potência.

O Rendimento (η) é um parâmetro que relaciona, neste contexto, a potência de saída relativamente à potência de entrada num dado sistema de energia. Com recurso às potências traçadas no dia de segunda-feira 7/05/2012, relacionaram-se a potência de saída P_{dc} e potência de entrada (S) (potência aparente) e que se podem visualizar na figura (4.19). Desta relação traçou-se a evolução do rendimento da subestação ao longo desse dia, podendo esta ser visualizada na figura (4.26), indicada a cor vermelha, onde também se apresenta o rendimento médio diário e que resulta na média dos valores verificados durante esse dia.

O Rendimento (η) médio verificado para este dia, que recorde-se foi o dia com maior consumo, foi de apenas 52%, representando um valor extremamente baixo para este tipo de sistemas.

No que concerne ao Fator de Potência este foi um parâmetro indicado e calculado pelo equipamento de monitorização, cujo algoritmo de cálculo pode ser consultado no Anexo 2. Para cada uma das medições efetuadas ao longo desse dia, também se traçou a sua evolução, que se pode visualizar na figura (4.26), indicada a cor azul. Também aqui se apresentou um valor médio diário que resulta na média dos valores monitorizados.

Constata-se que o Fator de Potência da instalação varia entre 0,68 e 0,76, sendo um indicador revelador do consumo de energia reativa (Q) que esta subestação apresenta, de certa forma já divulgado pela figura (4.19).

As curvas do Rendimento e Fator de Potência desta subestação, podem ser visualizadas na figura (4.26).

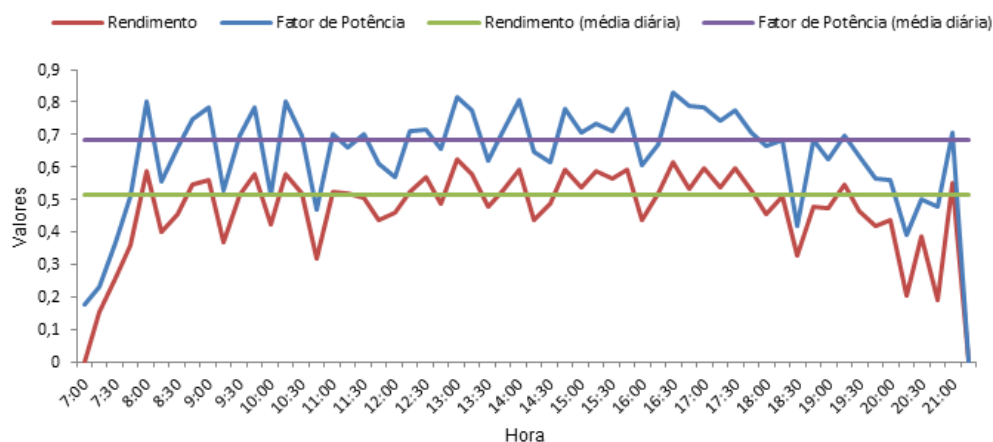


Figura 4.26 – Evolução do Rendimento (η) e Fator de Potência durante o dia de segunda-feira 07/05/2012.

4.4.2. Apresentação de Resultados da Monitorização na Subestação do Calhabé

Nesta seção são apresentadas as medições efetuadas durante o mesmo período de monitorização para a subestação do Calhabé.

4.4.2.1 Potência Medidas (DC, Ativa e Aparente)

- Quinta-Feira 03/05/2012

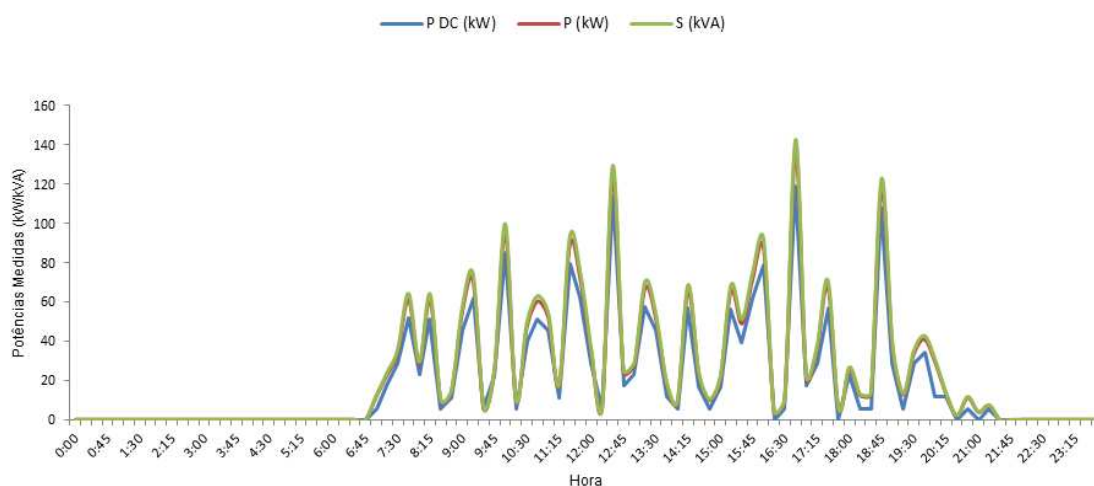


Figura 4.27 – Valores medidos no dia 03/05/2012- quinta-feira

- Sexta-Feira 04/05/2012

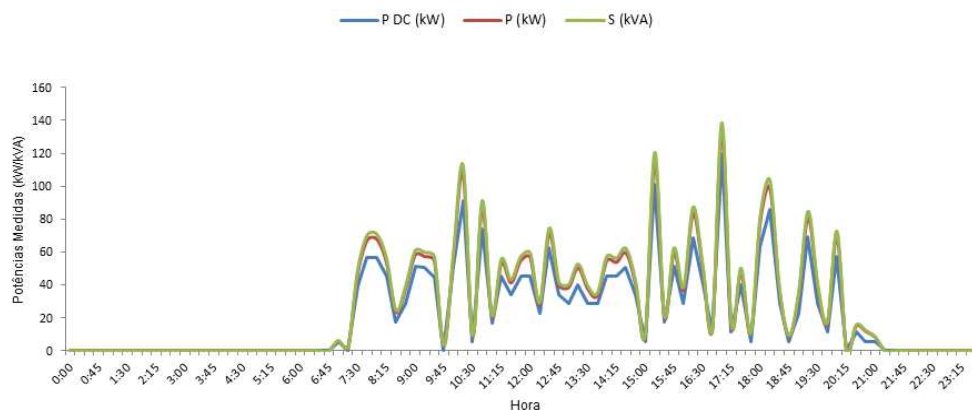


Figura 4.28 – Valores medidos no dia 04/05/2012- sexta-feira

- Segunda-Feira 07/05/2012

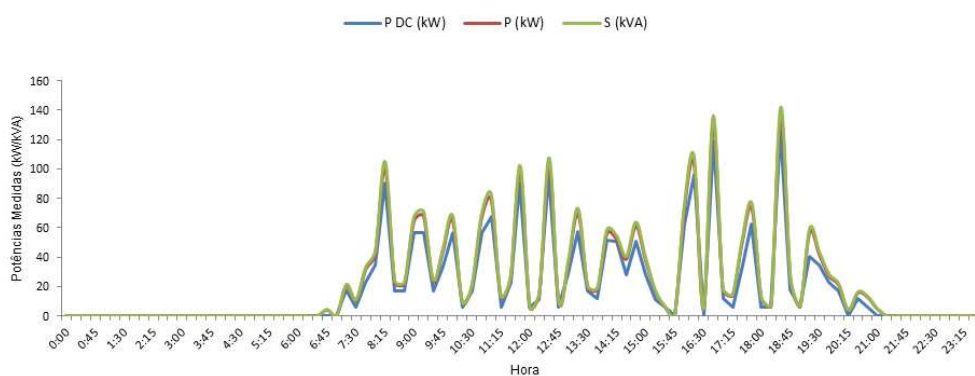


Figura 4.29 – Valores medidos no dia 07/05/2012- segunda-feira

- Terça-Feira 08/05/2012

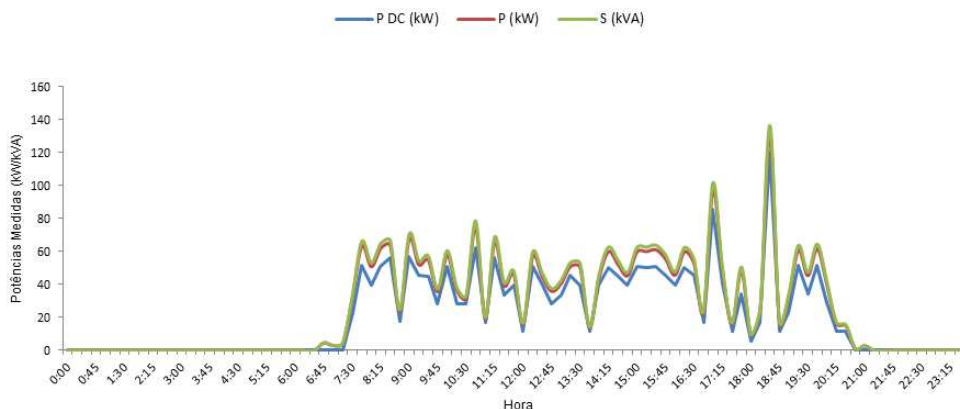


Figura 4.30 – Valores medidos no dia 08/05/2012- terça-feira

- Quarta-Feira 09/05/2012

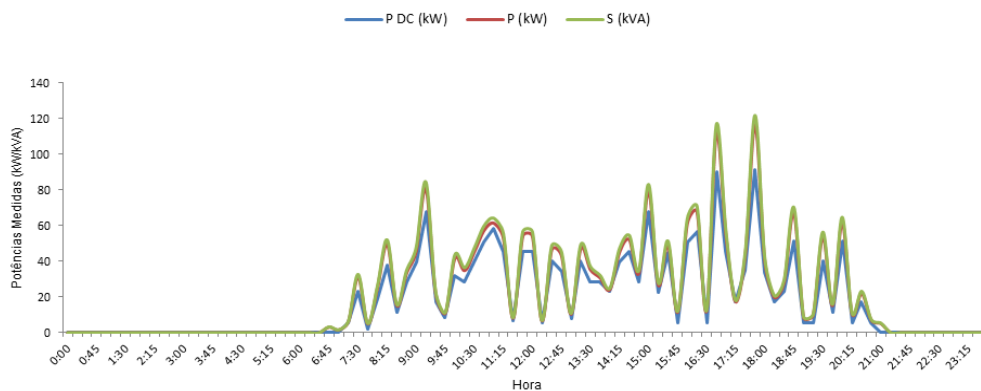


Figura 4.31 – Valores medidos no dia 09/05/2012- quarta-feira

- Quinta-Feira 10/05/2012

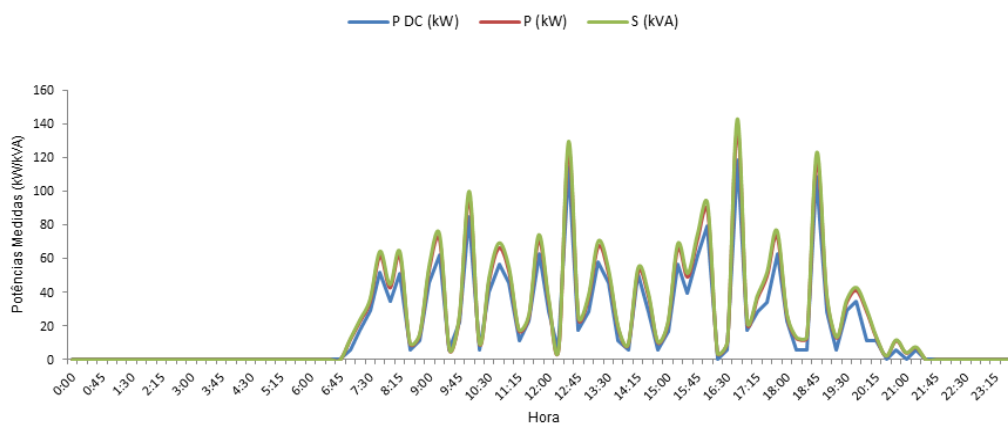


Figura 4.32 – Valores medidos no dia 10/05/2012- quinta-feira

Da análise a estes gráficos, constata-se que a diferença entre a potência aparente (S), identificada nos gráficos a cor verde e a potência ativa (P) identificada a vermelho nas curvas traçadas, é significativamente mais reduzida em comparação com as traçadas para a subestação de Montarroio. Este é um indicador muito importante para a energia reativa (Q), pois revela que o consumo de energia reativa desta subestação é significativamente inferior, ao consumo evidenciado pela subestação de Montarroio.

4.4.2.2 Parâmetros de Eficiência

Analogamente ao efetuado para a subestação de Montarroio, este estudo foi elaborado na subestação do Calhabé. Também aqui os parâmetros de eficiência considerados foram os da Distorção Harmónica, e neste contexto foram analisados a Distorção Harmónica da Corrente

(THD_i) e a Distorção Harmónica da Tensão (THD_v). Para além destes foram também estudados o Rendimento (η) e Fator de Potência

- Distorção Harmónica

Nesta subestação, por sua vez, considerou-se para efeitos de estudo da Distorção Harmónica, quer da corrente (THD_i) quer da tensão (THD_v), o dia de quinta-feira 10/05/2013, pelo fato de ser o dia em que, nesta subestação se verificaram consumos mais elevados, com a incidência para as 16h45m, onde o consumo foi o mais elevado em todo o período de monitorização.

Também aqui, esta escolha teve por base a tentativa de representar o funcionamento do sistema o mais aproximadamente possível ao seu funcionamento nominal. Portanto a potência ativa requerida foi de 136,65 kW, representando apenas 22,7% da potência do grupo retificador, que recorde-se é de 600 kW.

Estes dados permitiram ainda registar a evolução do THD_i (em%) ao longo do dia podendo esta ser visualizada no gráfico representado pela figura (4.33).

O valor médio diário do THD_i , foi de 26,07%.

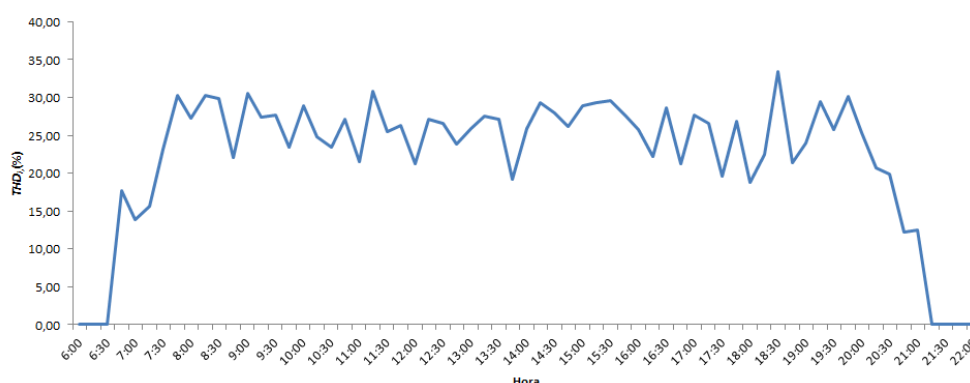


Figura 4.33 – Evolução do THD_i (em %) durante o dia de quinta-feira 10/05/2012

Com base nos valores das componentes harmónica, apresenta-se na figura (4.34) a comparação entre o espectro harmónico da subestação do Calhabé, às 16h45m de quinta-feira 10/05/2012 e o espectro harmónico da corrente teórica absorvida por um retificador trifásico de 6 pulsos. [39]

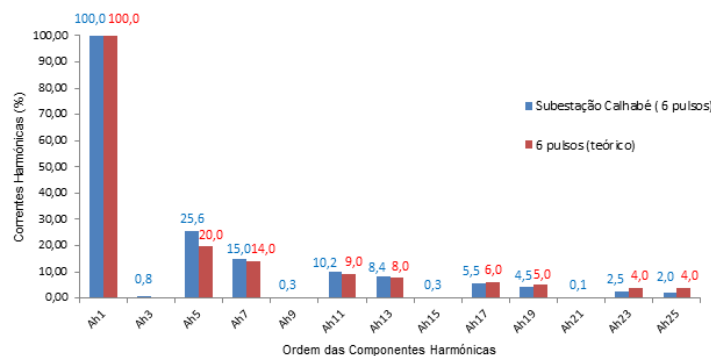


Figura 4.34 – Espectro harmónico às 16h45m de quinta-feira 10/05/2012, em comparação com o espectro harmónico teórico de um retificador 6 pulsos

No que diz respeito às harmónicas que seriam expetáveis de se encontrar, a 5ª, 7ª, 11ª e a 13ª, os valores registados encontram-se acima dos níveis teóricos, enquanto as restantes encontram-se ligeiramente abaixo dos valores teóricos em particular a 23ª e 25ª harmónica. Isto é justificável pelo fato de esta subestação se encontrar a funcionar a cerca de 1/4 da carga máxima.

A distorção harmónica na tensão tem a evolução que se pode visualizar na figura (4.35), apresentando valores mínimos e máximos respetivamente de 1,89% e os 3,05%. A média da Distorção Harmónica, neste dia, situa-se nos 2,35%.

Comparativamente com os resultados obtidos com a subestação de Montarroio constata-se que os valores da distorção harmónica na tensão entre ambas as subestações são bastante coincidentes. Estes dados são facilmente explicados pelo fato da média tensão destas subestações, apesar de serem linhas diferentes, estão alimentadas a partir do mesmo barramento de alta tensão (subestação do Marco dos Pereiros)

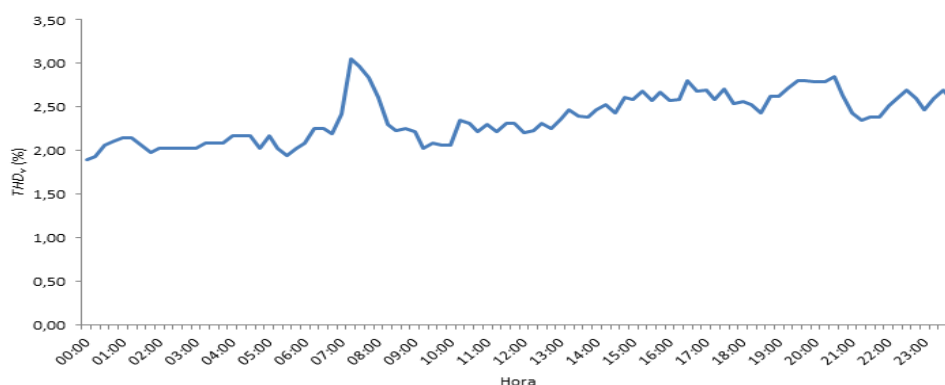


Figura 4.35 – Evolução do TDH_v (em %) durante o dia de quinta-feira 10/05/2012

○ Rendimento (η) e Fator de Potência

De forma análoga ao efetuado para a subestação de Montarroio e com recurso às potências traçadas no dia de segunda-feira 10/05/2012, que se podem visualizar na figura 4.32, foi traçado o Rendimento (η) desta subestação, com base na relação, entre a potência de saída (P_{dc}) e a potência de entrada (potência aparente) ao longo desse mesmo dia.

O Rendimento (η) desta subestação, apresentou variações entre 60% e 89%, sendo o seu valor médio diário de 80%. Estas variações são resultado da variação ao longo do dia do consumo verificado.

No que concerne ao Fator de Potência este parâmetro foi calculado também pelo equipamento de monitorização. Para cada uma das medições efetuadas, foi também traçado a sua evolução ao longo desse dia e que se pode visualizar na figura 4.26 (a cor azul).

O Fator de Potência da instalação é de 0,96, sendo um indicador revelador do pouco consumo de energia reativa (Q) que caracteriza esta subestação.

As curvas traçadas com evolução do Rendimento (η) e do Fator de Potência podem ser vistos na figura (4.36).

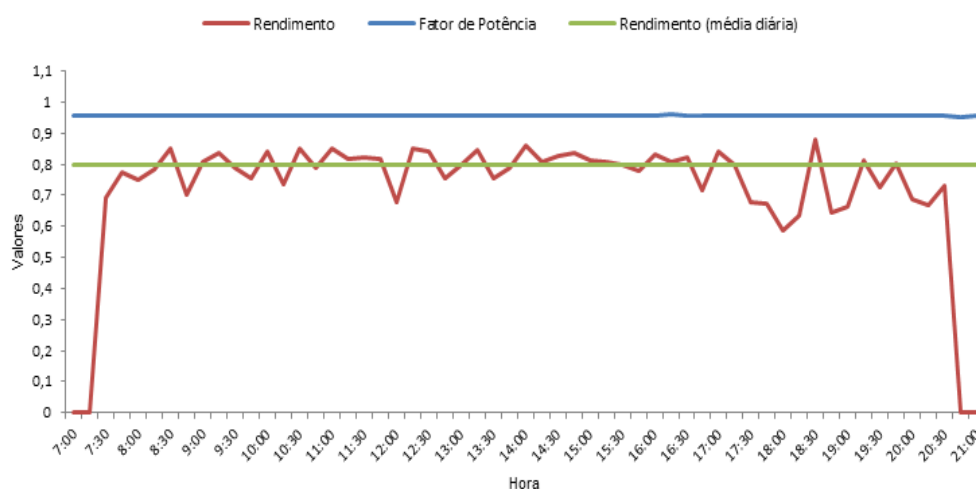


Figura 4.36 – Evolução durante o dia de quinta-feira 10/05/2012 do Rendimento (η) e Fator de Potência

4.4.3. Análise dos Resultados da Monitorização

As formas de onda representadas são reflexo do horário analisado das viaturas troleicarro, que se apresentou na secção 4.2.1.

Neste contexto, é nos periodos em que a partida de viaturas de ambas as linhas é coincidente, cenário que conforme vimos acontece às 10h15m, 10h30m, 10h45m, 12h45m, 13h00m e 13h15m, 15h15, 15h30 e 15h45 e 17h15 e 17h30m, que os consumos são mais elevados,

justificando deste modo e dentro destes horários os “picos” de potência requerida pelas viaturas. A potência ativa medida, nestes períodos, varia entre os 200 kW e os 332 kW para a subestação de Montarroio e os 50 kW e os 136 kW para a subestação do Calhabé, resultando níveis de carga na ordem dos 27,7% e 22,7% respetivamente.

O THD_i médio evidenciado por cada uma das subestações, foi de 11,59% e de 26,07%, respetivamente para a subestação de Montarroio e do Calhabé. Esta diferença é resultado direto do número de pulsos de retificação que cada uma delas contempla. Recorde-se que a retificação de Montarroio é caracterizada por ter 12 pulsos, enquanto a do Calhabé tem apenas 6 pulsos.

Ao nível das componentes harmónicas da subestação de Montarroio e em comparação com as ordens harmónicas que seriam expectáveis de se encontrar nesta subestação, constata-se que estas encontram-se abaixo dos níveis teóricos, justificadas pelo fato desta subestação estar a funcionar a pouco mais de 1/4 da sua carga máxima. Por outro lado, foram encontradas componentes harmónicas, que sob o ponto de vista teórico, não seriam expectáveis de se encontrarem (3ª, 5ª, 7ª e a 17ª), apresentando contudo valores significativos (5,9%, 11,2%, 6,1% e 2,7%). Esta situação é particularmente preocupante, pois poderá indicar um problema resultante da deficiente retificação de uma ou mais válvulas, levando deste modo a um desequilíbrio no consumo, tendo como consequência o deslocamento do ponto neutro da terra de proteção. Por sua vez, as componentes harmónicas evidenciadas pela subestação do Calhabé e que seriam expectáveis de se encontrar, ou seja a 5ª, 7ª, 11ª e a 13ª, encontram-se acima dos níveis teóricos, sendo as restantes ligeiramente abaixo desses mesmos valores em particular a 23ª e 25ª harmónica, apesar desta subestação se encontrar a abaixo de 1/4 da carga.

A distorção harmónica na tensão, THD_v , (%) na subestação de Montarroio varia entre 1,89% e os 3,24%, apresentando uma média diária de 2,53%, muito semelhantes aos valores apresentados pela subestação do Calhabé que apresenta valores entre 1,89% e os 3,05%, de onde resulta uma média de 2,35%. Estes dados são facilmente explicados pelo fato da média tensão destas subestações, apesar de serem linhas diferentes, estarem a ser alimentadas a partir do mesmo barramento de alta tensão da subestação de distribuição (subestação do Marco dos Pereiros).

Os respetivos rendimentos (η) apresentam, conforme se viu, valores muito diferentes. Este parâmetro encontra-se na casa dos 50% e fortemente dependente do fator de carga que a subestação de Montarroio. Também o fator de potência, desta subestação apresenta um valor baixo entre 0,68 e 0,76, fruto do seu funcionamento a baixas cargas e da tecnologia de retificação. O rendimento da subestação do Calhabé é substancialmente melhor e apesar da operação a baixas cargas este situa-se na casa dos 80%. Também o fator de potência é bastante melhor e está diretamente relacionado com tecnologia de retificação desta subestação, apresentando um valor entre 0,96 e 0,98. Importa esclarecer que os rendimentos (η) indicados dizem respeito ao conjunto transformador-retificador.

Face a estes dados, facilmente se conclui que a solução de retificação a díodos de que é dotada a subestação do Calhabé é mais eficiente do que a subestação de Montarroio.

4.5. Fatura Energética das Subestações

Os SMTUC têm um contrato de fornecimento de energia para cada uma das subestações com o distribuidor EDP Serviço Universal, que opera o mercado regulado. O período de análise foi de um ano, compreendido entre os meses de Novembro de 2011 e Outubro de 2012 e têm por base o histórico de faturas emitidas durante este tempo. Ambos os contratos têm ciclo diário e a tarifa contratada é a MT- médias utilizações tetra-horário.

A fatura energética com a rede de troleicarros atingiu um montante total de 90 743,15€, não estando incluídos neste valor o IVA, a taxa audiovisual e o imposto sobre o consumo de energia.

O custo com consumo de energia referente à subestação de Montarroio correspondeu a um total de 69 616,24€ e o da subestação do Calhabé correspondeu a um valor de 21 126,91€, representando respetivamente 76,72% e 23,28% do custo total. Nas figuras seguintes apresentam-se os custos com a energia e o respetivo consumo, por subestação (figura (4.37) e figura (4.38)).

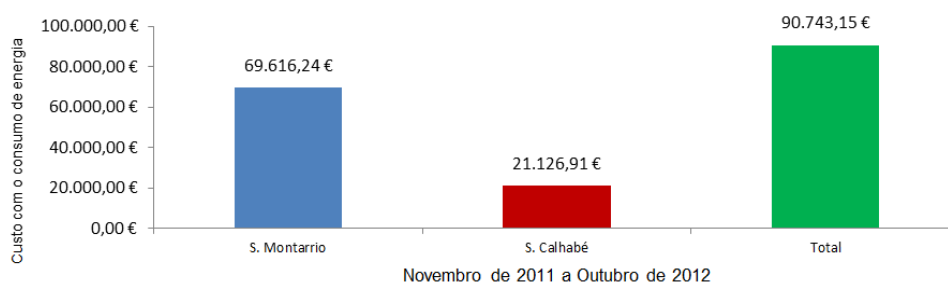


Figura 4.37 – Custo com energia por subestação em €

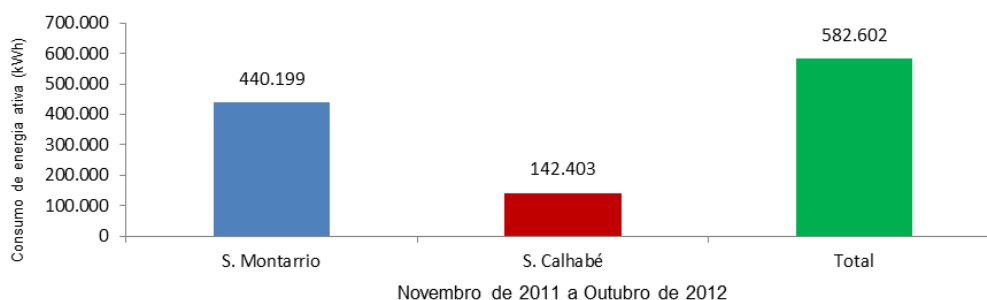


Figura 4.38 – Consumo de energia ativa por subestação em kWh

Em termos de energia ativa consumida os consumos totais foram de 582 602kWh repartidos em 440 199 kWh para a Subestação de Montarroio e 142 403 kWh para a subestação do Calhabé, representando 75,56% e 24,44%, respetivamente do consumo total.

4.5.1. Caracterização dos Custos Variáveis relativos ao consumo de energia das Subestações

Foram considerados como custos variáveis, os custos com energia que estão relacionados diretamente com o aumento ou diminuição do consumo.

Nestes custos, inserem-se os relacionados com a parte correspondente aos custos referentes ao somatório mensal da energia ativa, potência em horas de ponta e da energia reativa.

4.6.1.1 Custo Referente ao Consumo de Energia Ativa

A energia ativa consumida nas subestações foi de 440 199 kWh e de 142 403 kWh correspondendo respetivamente ao consumo verificado pela subestação de Montarroio e do Calhabé. Na figura (4.39) pode-se consultar os consumos discriminados dentro do ciclo tetra-horário. Destes consumos destaca-se o consumo em horas de ponta que ascendeu a 123 132 kWh.

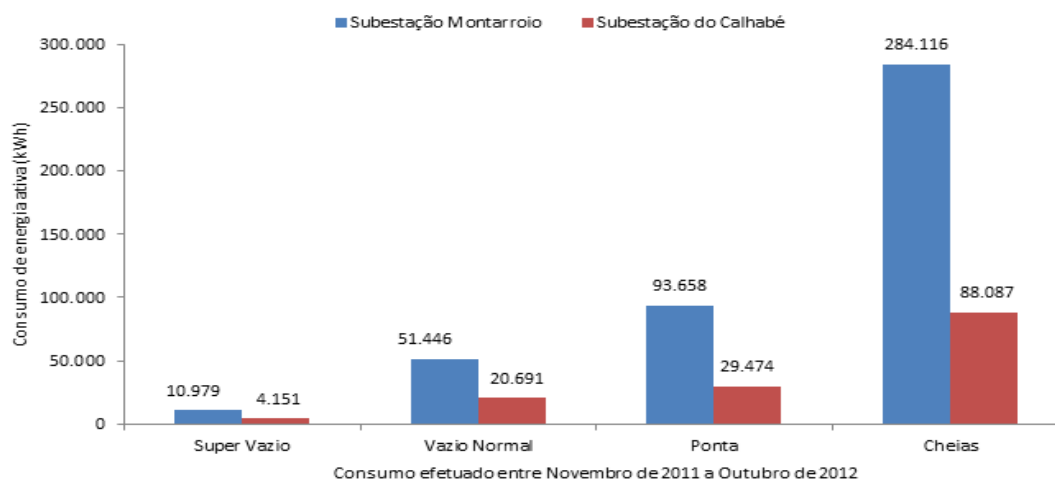


Figura 4.39 – Consumo de energia ativa no ciclo tetra-horário por subestação em kWh

Os custos totais de Energia Ativa, por subestação, ascenderam a 42 069,58€ para a subestação de Montarroio e de 13 428,82€ para a subestação do Cahabé, totalizando cerca de 55 498,40€.

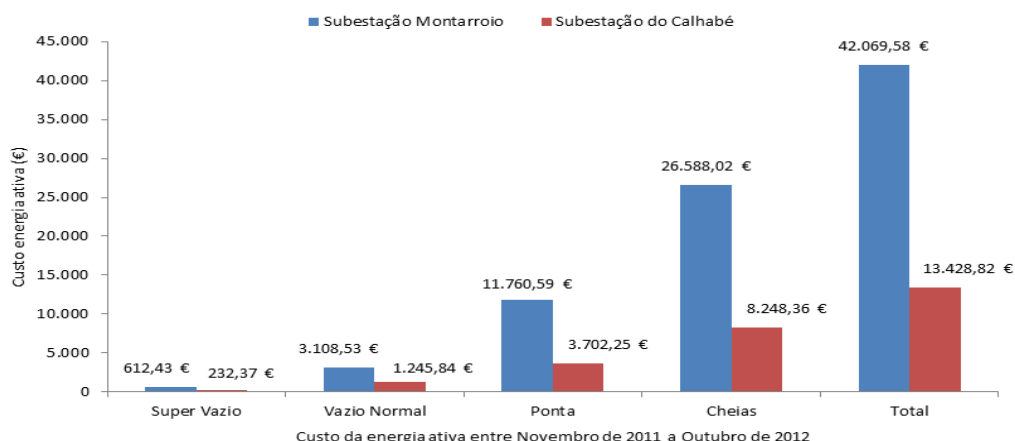


Figura 4.40 – Custo de energia ativa no ciclo tetra-horário por subestação, em €

4.6.1.2 Custo Referente à Potência em Horas de Ponta

O custo associado com a potência em horas de ponta foi de respetivamente de 6 835,40€, para a subestação de Montarroio e de 2 151,14€, para a subestação do Calhabé, totalizando o valor de 8 986,54€. O custo mensal da potência em horas de ponta, por subestação, pode ser consultado na figura (4.41).

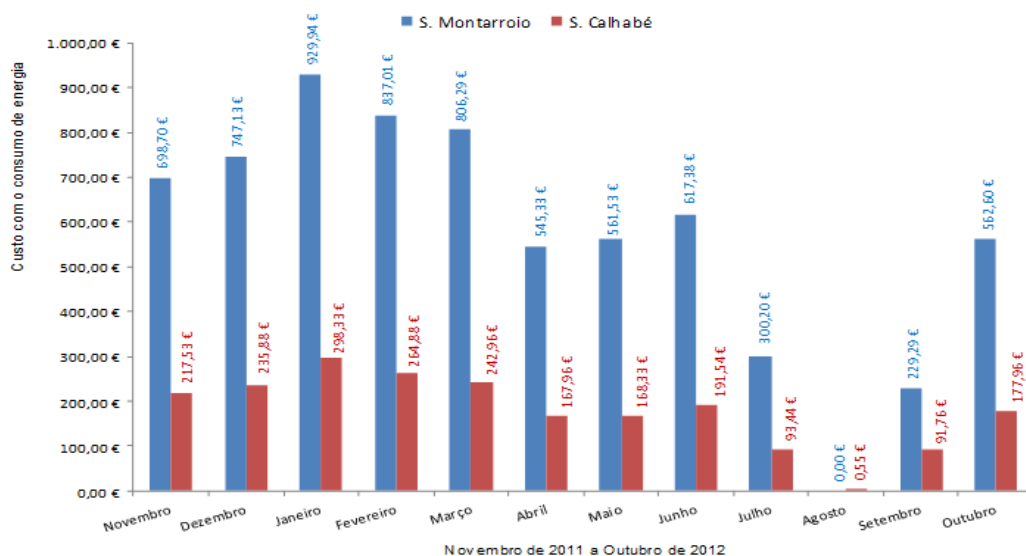


Figura 4.41 – Evolução mensal do custo da potência em horas de ponta por subestação em €

Relacionando estes dados com o consumo de energia em horas de ponta, que recorde-se ascendeu a 123 132 kWh pode-se calcular o custo por kWh tido com o termo de potência em horas de ponta. Neste pressuposto este custo foi de 0,07€/kWh.

4.6.1.3 Custo referente ao consumo de Energia Reativa

A análise efetuada às faturas de energia revela ainda um outro custo referente ao consumo de energia. Consta-se que, no que concerne à subestação de Montarroio esta apresenta um substancial custo com a energia reativa, situação esta que não se verifica na subestação do Calhabé. Tal situação já seria de esperar e dela se deu conta quando se procedeu a apresentação da monitorização efetuada às respetivas potências.

Este consumo cifrou-se, no período analisado, num valor de 11 768,13€ como consequência do baixo valor do fator de potência da instalação. Isto é resultado da tecnologia do equipamento de retificação.

O valor da energia reativa tem um peso na faturação total de energia na subestação de Montarroio de 16,86%.

Os custos mensais com a Energia Reativa pode ser vista na figura (4.42)

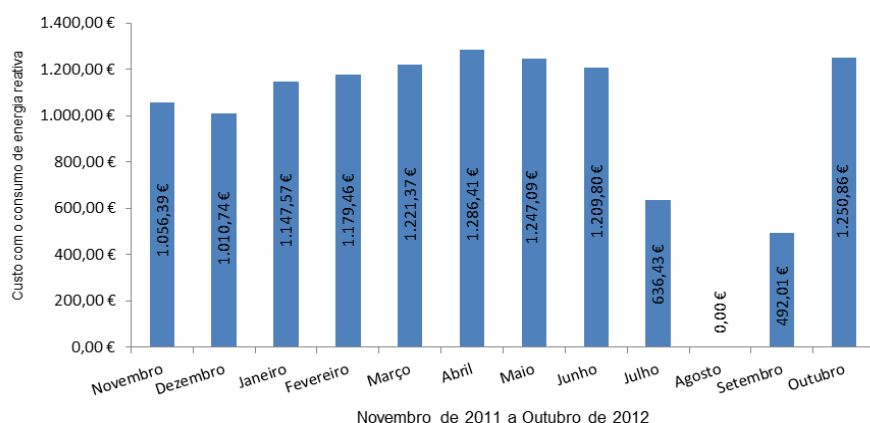


Figura 4.42 – Evolução mensal do custo da energia reativa na subestação de Montarroio em €

Os custos variáveis totais por subestação são respetivamente de 60 673,11€ para a subestação de Montarroio e de 15 725,43€ para o Calhabé, o que corresponde a um total geral de 76 398,54€.

4.5.2. Caracterização dos Custos Fixos relativos ao consumo de energia das Subestações

Os custos fixos considerados traduzem-se no somatório mensal da potência contratada e do termo fixo. Estes custos totalizam 8 403,87€ para a subestação de Montarroio e de 4 832,23€, para a subestação do Calhabé e estão diretamente relacionados com o item tarifário referente à potência contratada para as subestações. A potência contratada para a subestação de Montarroio é de 558 kW e para a subestação do Calhabé é de 320,85 kW.

O termo fixo é igual para as duas subestações e totaliza 569,26€ por subestação.

Na tabela (4.5) encontraram-se evidenciados os custos anuais tidos com estes itens, por subestação.

Tabela 4.5 – Custos anuais com potência contratada e termo fixo, por subestação

Subestação	Potência Contratada (kW)	Custo (€)	Termofixo (€)
Montarroio	558 kW	8 403,87€	569,26 €
S. Calhabé	320,85	4 832,23€	569,26 €

Assim os custos fixos totais estão repartidos em 8 973,13€ para a subestação de Montarroio e de 5 401,49€ para o Calhabé, totalizando em valor de 14 374,72€.

4.6. Conclusões

Este capítulo tinha à partida duas vertentes de análise no que concerne à operação das subestações de retificação. O primeiro era o funcionamento sob o ponto de vista transitório e que decorre do arranque simultâneo de viaturas troleicarro. Basicamente esta análise indica-nos qual o número de viaturas em arranque simultâneo que nos permitirá estimar a potência de pico que cada subestação. Sob este aspeto conclui-se que, a subestação mais solicitada é a subestação de Montarroio, isto porque alimenta as duas linhas, *Linha nº 4* e *Linha nº 103*, nos seus trajetos ascendentes, o que não acontece na subestação do Calhabé, que alimenta apenas uma secção da *Linha nº 103*. Nesta análise conclui-se também que o número máximo de viaturas em trajeto ascendente são quatro viaturas, apesar de esta situação acontecer apenas em algumas partidas, cuja frequência de serviço é de 15 minutos.

Para este efeito efetuou-se um estudo estatístico para quantificar a probabilidade do arranque simultâneo destas quatro viaturas. Daqui se conclui, por comparação com a monitorização efetuada em contexto real, que o estudo estatístico se revela mais exigente, do que em operação real. Um outro ponto que ressaltou desta monitorização foi o tempo efetivo do funcionamento de três e quatro viaturas troleicarro. Constatou-se que a operação conjunta foi apenas de 1 minuto e 36 segundos e de 9 segundos, por cada meia hora de operação, respetivamente, contra os cerca de 5 minutos que se estimou, face à conjugação de horários.

Portanto, um sistema que garanta o funcionamento do arranque simultâneo do estudo estatístico, garantirá com certeza o funcionamento real, uma vez que este não se verificou tão exigente como o previamente estimado.

O segundo aspeto a ter em conta é a potência que cada uma das subestações fornece durante o seu funcionamento (por integração de período de 15 minutos) e que se situam entre os 200 kW e 332 kW e os 50 kW e 136 kW, respetivamente para as subestações de Montarroio e do Calhabé e que resultam da monitorização efetuada com o analisador de energia. Face aos

resultados obtidos com estas medições conclui-se também que a subestação de Montarroio têm um rendimento baixo, na ordem dos 50%, em contrapartida com o rendimento de cerca de 80% da subestação do Calhabé. Esta monitorização evidenciou também algumas incongruências entre o espectro harmónico teórico de um retificador de 12 pulsos e o verificado pelo espectro harmónico da subestação de Montarroio, revelando provavelmente problemas em uma ou mais ampolas de mercúrio e que terá como consequência um consumo desequilibrado nas fases da alimentação, por exemplo.

Transversalmente a estes dois aspetos há também que analisar os custos associados ao consumo de energia. Neste contexto, é fácil de perceber que a substituição dos equipamentos retificadores por equipamentos energeticamente mais eficientes e com melhores rendimentos, se traduzirá em menores custos variáveis decorrentes com o consumo de energia ativa, ou seja menos custos por kW/h consumido e com menos emissões de GEE, melhorando substancialmente a sustentabilidade económica e ambiental do sistema de tração.

Um outro aspeto e que se traduz por um incremento importante nos custos com a energia é o custo verificado com o consumo de energia reativa. Sendo este fator irrelevante para a subestação do Calhabé, o mesmo não se pode aplicar à subestação de Montarroio. O custo com a energia reativa nesta subestação é de 11 768,13€ anuais e representa cerca de 16,86% do valor pago pelo consumo de energia desta subestação e quando transposto para o custo total com o consumo de energia, este representa 12,96% do custo anual pago pelo consumo total de energia. Estes dados levam a admitir que o consumo de energia reativa representa um custo alto e que tenderá a aumentar, face às medidas restritivas legalmente em vigor e consequentemente penalizadoras nos tarifários de energia.

Para além disto importa referir que os custos por kWh tido com o termo de potência em horas de ponta foram de 0,07€/kWh, um obviamente não negligenciável. Ao diminuirmos o consumo em horas de ponta e consequentemente a termo de potência em horas de ponta, também o custo será diminuído em 0,07€/kWh.

Por fim falta referir os custos fixos das duas subestações. Neste contexto e face às potências monitorizadas, as potências contratadas apresentam um desajuste face à realidade pois estas situam-se nos 558 kW e 320,85 kW, respetivamente para a subestação de Montarroio e do Calhabé, respetivamente. Estes valores estão muito acima ao que é necessário pois conforme vimos anteriormente têm potências consumidas entre 200 kW e 332 kW e os 50 kW e 136 kW, respetivamente, para as subestações de Montarroio e do Calhabé. Este custo é evitável e desnecessário sendo por si só um incremento direto aos custos fixos destas instalações. Um ajuste na potência contratada traduzir-se-á numa importante redução de custos energéticos.

5. PROPOSTAS, CENÁRIOS DE MELHORIA E RESPECTIVAS VIABILIDADES TECNO-ECONÓMICA

5.1. Introdução

Este capítulo tem como objetivo a apresentação de soluções que podem ser implementadas e se enquadrem nos objetivos gerais deste trabalho. Pretende-se assim contribuir de forma a tornar as subestações de retificação da rede de tração da Cidade de Coimbra mais eficientes, garantindo uma maior sustentabilidade ambiental e contribuindo deste modo para que a exploração deste sistema garanta um menor custo no consumo de energia (kWh) por quilómetro percorrido. Da implementação destas medidas resultará um menor custo financeiro com o consumo de energia.

Associado a esta questão importante é necessário também avaliar a viabilidade técnica e económica de cada uma das soluções preconizadas, de forma a chegar-se à solução que do ponto de vista financeiro resulta na melhor opção a adotar.

Posto isto, este capítulo começa com o dimensionamento dos equipamentos que sob o ponto de vista técnico garantem o funcionamento da rede de troleicarros da cidade de Coimbra, quer no que concerne às potências requeridas quer ao regime de sobrecarga associado a estes equipamentos.

Em seguida são apresentados os investimentos que se poderão efetuar para melhorar a eficiência das subestações, por ordem decrescente do valor do investimento sendo que neste aspeto são apresentadas duas soluções. Uma referente à substituição dos equipamentos em ambas as subestações e outra referente apenas à substituição do equipamento de retificação na subestação de Montarroio. Neste caso inclui-se também a necessária remodelação dos restantes constituintes desta subestação, como os seccionadores de entrada e proteção necessários, pela razão dos níveis de tensão de serviço atuais não serem os mesmos que os da rede de distribuição de energia e que se situam nos 15 kV.

Finalmente far-se-á uma abordagem genérica sobre os parâmetros financeiros que ajudam a balizar a melhor opção de investimento a efetuar, sempre com o horizonte nos custos que esse investimento representa, resultando daqui uma importante ferramenta na ajuda à decisão sobre a melhor solução a tomar.

Acresce ainda dizer que não existem investimentos ótimos, o que existe são investimentos em linha com o risco que estivermos dispostos a correr e em consonância com a disponibilidade financeira que se dispõe para se fazer face a esse mesmo investimento.

5.2. Dimensionamento dos Equipamentos

O dimensionamento dos equipamentos para as subestações foi efetuado com base nas medições apresentadas no 4º Capítulo. Para este efeito, consideraram-se os valores de corrente máxima e tempos de arranque (t_a), respetivamente de 400A e de 10 segundos, independentemente do tipo de viatura troleicarro (*Efacec/Salvador Caetano* ou *Skoda/Solaris*).

O sistema escolhido para este estudo recaiu sobre um sistema *Retificador* de 6 pulsos. Esta escolha teve a ver com os seguintes fatores:

- Inexistência de qualquer vantagem na utilização de conversores equipados com tirístores ou IGBT, uma vez que não existe a necessidade de qualquer controlo da tensão de serviço da rede de tração (tornando esta esta opção mais onerosa).
- Um melhor fator de potência a baixas cargas dos *Retificadores* face aos *Conversores AC-DC* equipados com tirístores, levando deste modo a que a corrente aparente seja elevada e as correntes harmónicas em valores absolutos sejam maiores. [28] [30]
- Custo significativamente inferior do retificador de 6 pulsos em comparação com retificadores com outras topologias, nomeadamente de 12 e de 24 pulsos³². [28]

Um outro aspeto que se teve em conta foi a orografia que tanto o percurso da *Linha nº 4* como o da *Linha nº 103* apresentam e que se deu conta no Capítulo 3. Neste sentido optou-se por equipamentos com um ciclo de sobrecarga de classe superior ao ciclo de sobrecarga mais habitual na implementação de redes de troleicarro³³. Os equipamentos escolhidos cumprem, neste contexto os requisitos da Classe VI o que garante por sua vez um funcionamento mais severo decorrente da orografia das linhas operadas.

Para além deste aspeto optou-se ainda por incluir nestes retificadores a possibilidade de a qualquer momento, a potência nominal seja ser duplicada. Para este efeito estes equipamentos estão já habilitados a incluir uma nova ponte trifásica de mesma potência permitindo a qualquer momento ampliar a rede de troleicarros. Caso esta situação aconteça, apenas seria necessário ajustar a potência dos transformadores de potência.

Nesta fase a implementação desta solução tem custos incomparavelmente mais reduzidos do que se for feito *a posteriori*.

Seguidamente apresentam-se as características dos equipamentos a instalar, por subestação.

- Subestação de Montarroio

Considerando as estimativas estatísticas apresentadas na secção 4.2.4 e aplicando estas ao tempo de funcionamento estimado de simultaneidade das viaturas em serviço nos horários³⁴ que

³² Se o investimento num sistema de retificação não controlado de 6 pulsos for de C_i , este duplicará ($2 \times C_i$) em comparação com um equipamento de 12 pulsos e triplicará ($3 \times C_i$) em comparação com um equipamento de 24 pulsos.

³³ De acordo com a EN 50328 e IEC 60146-1-1, devem cumprir para este efeito a Classe V.

³⁴ Estes Horários, conforme se viu na secção 4.2.4 são os mais críticos no funcionamento da subestação de Montarroio. Os horários de partida que se encontram nestas condições são os das 10h15m, 10h30m, 10h45m, 12h45m, 13h00m e 13h15m, 15h15m, 15h30m e 15h45m e 17h15m e 17h30m.

implicam um funcionamento mais exigente, pode-se estimar o tempo de funcionamento em regime de sobrecarga desta subestação. Considerando intervalos de 5 minutos após essas partidas e generalizando para uma hora h , têm-se;

- $h + 5$ minutos – duas viaturas em operação conjunta;
- Entre $h+5$ minutos e $h+10$ minutos - duas viaturas em operação conjunta;
- Entre $h+10$ minutos e $h+15$ minutos – duas viaturas em operação conjunta;
- Entre $h+15$ minutos e $h+20$ minutos – quatro viaturas em operação conjunta (durante um curto espaço de tempo, que se pode estimar entre 1 a 5 minutos);
- Entre $h+20$ minutos e $h+25$ minutos – três viaturas em operação conjunta;
- Entre $h+25$ minutos e $h+30$ minutos – duas viaturas em operação conjunta.

A conjugação destes dados permitem estimar o tempo de funcionamento em simultâneo, neste cenário que conforme se indicou é o mais crítico. Estes resultados estão sistematizados na tabela (5.1).

Tabela 5.1 – Tempo de funcionamento em simultâneo num horário h referente à subestação de Montarroio

Hora de partida (h)	Nº viaturas	Consumo máximo estimado no arranque (para $t_a=10s$)	P - Probabilidade de ocorrência (estimado)	T -Tempo estimado de operação conjunta	Tempo em funcionamento simultâneo ($T \times P$)
$h + 5$ minutos	2	800A	22,1%	5 Minutos (300 seg.)	1 m e 6 seg.
$h+5$ minutos < h < $h+10$ minutos	2	800A	22,1%	5 Minutos (300 seg.)	1 m e 6 seg.
$h+10$ minutos < h < $h+15$ minutos	2	800A	22,1%	5 Minutos (300 seg.)	1 m e 6 seg.
$h+15$ minutos < h < $h+20$ minutos	4	1600A	2,8%	5 Minutos (300 seg.)	8 seg.
$h+20$ minutos < h < $h+15$ minutos	3	1200A	9,2%	5 Minutos (300 seg.)	28 seg.
$h+25$ minutos < h < $h+10$ minutos	2	800A	22,1%	5 Minutos (300 seg.)	1 m e 6 seg.

Face a estes dados e conjugando com valores de consumo máximo estimado no arranque, o ciclo de sobrecarga de Classe VI, indicados na EN 50328 e IEC601461-1 e com as potências medidas durante o período de monitorização, que recorde-se se situam entre os 200 kW e 332 kW, propõe-se um retificador com uma potência de 450 kW³⁵.

Este equipamento permite alimentar a seguinte carga:

- 1,0 p.u. regime permanente – 692 A
- 1,5 p.u. durante 2 h – 1038 A
- 3,0 p.u. durante 1 minuto (60 segundos) – 2076 A

³⁵ A potência de 450kW para este retificador representa uma intensidade nominal de 692A para uma tensão de 650V_{dc}

Um equipamento de retificação com esta potência garante o funcionamento da subestação de Montarroio nas condições descritas e é sustentado por:

- i) O sistema **não alimenta** continuamente duas viaturas troleicarro permanentemente durante mais do que duas horas, correspondendo nestas circunstâncias a um consumo máximo de cerca de 800 A, o que é inferior aos 1038 A que o retificador proposto garante e,
- ii) O tempo de funcionamento simultâneo de 3 e 4 viaturas troleicarro em conjunto **não excede mais** do que 36 segundos (28 segundos + 8 segundos, respetivamente), correspondendo nestas circunstâncias a um consumo máximo de 1600 A, o que é **inferior** aos 2076 A que o retificador proposto consegue garantir durante um minuto.

- Subestação do Calhabé

Para a subestação do Calhabé, o dimensionamento é facilitado pelo funcionamento da própria subestação. Recorde-se que esta subestação alimenta apenas uma secção da rede de tração cujo trajeto é ascendente, referente à *Linha nº 103* cuja frequência de passagem é apenas de uma viatura de 15 em 15 minutos. A potência ativa medida durante o período de monitorização situou-se situam entre os 50kW e 136kW.

Neste sentido o equipamento de retificação proposto tem uma potência de 150 kW e o seu ciclo de sobrecargas, também garante a Classe VI. A intensidade nominal deste retificador é de 230A, permitindo alimentar a seguinte carga:

- 1,0 p.u regime contínuo – 230 A
- 1,5 p.u durante 2h – 346 A
- 3,0 p.u durante 1minuto – 692 A

5.3. Descrição do Estudo Efetuado

A análise efetuada ao funcionamento das subestações, apresentada no capítulo 4, direciona-nos para três opções.

- *Opção 1* - Substituição dos sistemas de retificação em ambas as subestações e o consequente ajuste nas suas potências contratadas.
- *Opção 2* - Substituição apenas do sistema de retificação na subestação de Montarroio, contemplando também o ajuste nas potências contratadas das duas subestações,
- *Opção 3* - Contempla apenas o ajuste da potência contratada e tem o objetivo enquadrar este fator para os níveis do consumo real verificado, sendo que tem um impacto significativo nos custos com a fatura de energia (cerca de 12%).

Um outro ponto importante e constatado quer pelas medições efetuadas na subestação do Calhabé quer pela fatura energética desta subestação é o fator de potência e o consequente custo com a energia reativa, que nesta situação concreta é quase nulo.

Neste contexto, a monitorização efetuada demonstrou que apesar de ambas as subestações estarem a funcionar apenas entre os 20% e os 25% da carga, a tecnologia subjacente à retificação de 6 pulsos a diodos apresenta um custo quase nulo com energia reativa, fruto de um fator de potência bastante mais elevado (entre 0,96 e 0,98).

A instalação de retificadores de 6 pulsos a diodos por si só e no caso concreto da subestação de Montarroio vai também resultar numa melhoria substancial fator de potência, que passará a apresentar valor dessa ordem (entre 0,96 e 0,98), resultando daqui um consumo nulo de energia reativa, deixando por esta via de haver qualquer custo associado.

Um outro aspeto que se teve em conta neste estudo foi de que as condições de funcionamento não se alteram, ou seja o número de viaturas troleicarro em serviço e os seus horários manter-se-ão.

Importa ainda acrescentar que, para efeitos de contabilização da poupança energética que se apresenta nas seções seguintes, foi considerado que o rendimento médio dos equipamentos novos a instalar é 99,7%³⁶

5.3.1. Opção 1 – Substituição dos Sistemas de Retificação nas subestações de Montarroio e do Calhabé e ajuste na potência contratada.

Esta opção, designada por *Opção 1*, será a solução que do ponto de vista técnico será a melhor de todas, uma vez que irá permitir a substituição dos equipamentos existentes, menos eficientes, por outros muito mais eficientes, com uma consequente redução do consumo de energia, tornando ambas as subestações, mais sustentáveis.

Esta opção contudo leva a um maior custo de investimento do que todas as outras opções em análise. Para além disto e no caso particular da subestação de Montarroio, esta substituição permitirá também substituir um equipamento com perigo para a saúde pública e para o ambiente.

5.3.1.1.– Custos e descrição dos equipamentos e trabalhos a efetuar na Opção 1

Nesta opção o valor total do investimento ascende a 123 835,90€, estando os trabalhos e os equipamentos a instalar e a efetuar discriminados na tabela (5.2).

³⁶ Dados fornecidos do fabricante indicando respetivamente de 99,68% a 99,72% para cargas entre 100% a 33% respetivamente.

Tabela 5.2 – Investimento *Opção 1* - Custos e descrição dos equipamentos e trabalhos a efetuar

Cap.	I – Subestação de Montarroio	
1.1	Entrada de energia – Fornecimento e instalação de:	
1.1.1	Cela de entrada de energia tipo SM6 IM 17,5kV – 16kA, equipada com interruptor - seccionador - seccionador de terra em SF6, com comando CIT manual, Cela de medida tipo SM6 GBCB 17,5kV – 16kA, para TI + TT e entrada e saídas superiores por barras, cela proteção, equipada com disjuntor SM6 DM1C 17,5kV 20kA, e disjuntor SF Set comando manual, seccionador a jusante e canalizações elétricas de média e baixa tensão, para corrente DC.	
1.2	Grupo Transformador/Retificador - Fornecimento e instalação de:	
1.2.1	Retificador de tração ³⁷ 450kW/650Vdc e Transformador do Tipo Seco 500kVA (ambos equipamentos preparados para uma sobrecarga máxima admissível de acordo com a Classe VI de sobrecarga	
1.3	Outros trabalhos e fornecimentos:	
1.3.1	Fornecimento e instalação de Quadro elétrico de distribuição de Corrente Contínua	
1.3.2	Execução de trabalhos de alteração do traçado aéreo para subterrâneo, na subestação de Montarroio, na interligação entre a subestação e a Rede de Tração	
Total do Capítulo I		86.167,90€
Cap.	II – Subestação de Calhabé	
2.1	Grupo Transformador/Retificador - Fornecimento e instalação de:	
2.1.1	Retificador de tração 150kW/650Vdc, e Transformador do Tipo Seco 200kVA (ambos equipamentos preparados para uma sobrecarga máxima admissível de acordo com a classe VI)	
2.2	Outros trabalhos e fornecimentos:	
2.2.1	Fornecimento e instalação de Quadro elétrico de distribuição de Corrente Contínua.	
Total do Capítulo II		37.668,00€
Custo Total do Investimento da Opção 1		123.835,90€

5.3.1.2.– Poupança Energética e Financeira decorrente da implementação da Opção 1

Seguidamente apresenta-se a poupança energética e financeira estimada, com a implementação desta solução. Para este efeito recorreu-se aos dados indicados na secção 4.6.1.1 que resultaram dos dados de faturação de energia por parte do comercializador. Nestes dados estão contemplados os consumos de energia ativa dentro dos respetivos ciclos horários. Na tabela (5.3) encontra-se indicado o consumo anual verificado nas duas subestações.

Tabela 5.3 – Consumos energéticos anuais verificados antes da implementação da *Opção 1*

	Consumos Energia Ativa (kWh)				
	Super Vazio	Vazio Normal	Ponta	Cheias	Totais
Sub. Montarroio	10 979	51 446	93 658	284 116	440 199
Sub. Calhabé	4 151	20 691	29 474	88 087	142 403
Totais	15 130	72 137	123 132	372 203	582 602

³⁷ De acordo com a especificação técnica: DT RECTIFICADOR 650V 450kW PT e DT RECTIFICADOR 650V 150kW PT estes equipamento estão preparados para receber uma nova ponte trifásica, para uma expansão futura de 450kW e 150kW adicionais, respetivamente.

Com a implementação da *Opção 1*, que implica a substituição dos equipamentos existentes por outros mais eficientes, obter-se-á uma redução efetiva no consumo de energia.

Na tabela (5.4) evidenciam-se os consumos energéticos anuais estimados³⁸ após a implementação da *Opção 1*.

Tabela 5.4 – Consumos energéticos anuais estimados após a implementação da *Opção 1*

	Consumos Energia Ativa (kWh)				
	Super Vazio	Vazio Normal	Ponta	Cheias	Totais
Sub. Montarroio	5 616	26 316	47 909	145 335	225 177
Sub. Calhabé	3 289	16 395	23 355	69 789	112 837
Totais	8 905	42 711	71 264	215 133	338 014

Da diferença entre as tabelas (5.4) e (5.5) chega-se à poupança de energia estimada e que no total ascende a 244 588 kWh. Destes, 215 022 kWh correspondem à poupança no consumo de energia da subestação de Montarroio e 29 566 kWh correspondem à poupança no consumo de energia na subestação do Calhabé.

Na tabela (5.5) encontra-se indicado poupança anual estimada pela implementação da *Opção 1*.

Tabela 5.5 – Poupança anual estimada pela implementação da *Opção 1*

	Consumos Energia Ativa (kWh)				
	Super Vazio	Vazio Normal	Ponta	Cheias	Totais
Sub. Montarroio	-5 363	-25 130	-45 749	-13 8781	-215 022
Sub. Calhabé	-862	-4296	-6 119	-18 289	-29 566
Totais	-6 225	-29 426	-51 868	-15 7070	-244 588

Esta poupança anual estimada no consumo de energia tem implicações diretas numa poupança financeira. Para o cálculo desta poupança procedeu-se a afetar os consumos diferenciados (dentro do ciclo horário) ao custo unitário de energia respetiva. Os valores considerados resultaram da média entre o custo e o consumo efetuado no período analisado de um ano e constantes das respetivas faturas de energia, resultando daqui uma poupança financeira anual estimada e resultante da implementação desta opção de 23 337,66€.

Na tabela (5.6), apresentam-se os valores resultantes desta poupança, discriminados pelo respetivo ciclo horário.

³⁸ Esta estimativa foi efetuada com base na substituição do equipamento de retificação de Montarroio, com um rendimento médio de 51% por outro com rendimento de 99,7% e na substituição do equipamento de retificação de Calhabé, com um rendimento médio de 82% por outro também com rendimento de 99,7%.

Tabela 5.6 – Poupança financeira estimada e discriminada resultante da implementação da *Opção 1*³⁹

	Poupança Anual (€)				
	Super Vazio	Vazio Normal	Ponta	Cheias	Totais
Sub. Montarroio	-299,15€	-1 518,41€	-5 744,64€	-12 987,33€	-20 549,53€
Sub. Calhabé	-48,24€	-258,66€	-768,67€	-1 712,55€	-2 788,13€
Totais	-347,40€	-1 777,08€	-6 513,31€	-14 699,88	-23 337,66€

A esta poupança acresce somar o valor poupado com custos por kWh tido com o termo de potência em horas de ponta que foi de 3 630,76€. Apoupança total é assim de 26 968,42€.

5.3.1.3.– Poupança resultante do ajuste da Potência Contratada

Para além da poupança gerada com a instalação destes equipamentos, o ajuste da Potência Contratada vai também permitir uma poupança nos custos com a fatura energética. Neste momento, e de acordo com as faturas do comercializador, as potências contratadas situam-se nos 558 kW e 320,85kW, correspondendo a um custo entre Novembro de 2011 e Dezembro de 2012 a 8 403,87€ e 4 834,23€, respetivamente para a subestação de Montarroio e do Calhabé.

Na monitorização efetuada, constatou-se que era possível proceder a um ajuste deste item, adaptando este à realidade do consumo, pelo que propõe-se que estas potências passem para 500kW e 200kW respetivamente. Com esta alteração na Potência Contratada a poupança anual estimada ascenderá a 2 693,60€.

Na tabela (5.7) encontram-se discriminados os valores com o custo e a potência contratada por subestação antes do ajuste e o custo e a potência contratada por subestação após o ajuste da Potência Contratada.

Tabela 5.7 – Poupança anual estimada resultante do ajuste da Potência Contratada

	Custo e potência antes do ajuste		Custo e potência após do ajuste		Poupança Financeira (€)
	Custo com o fator Potência Contratada	Potência Contratada (kW)	Nova Potência Contratada (kW)	Custo com o fator Potência Contratada	
Sub. Montarroio	8 403,87€	558	500	7 530,35€	-873,52€
Sub. Calhabé	4 834,23€	320,85	200	3 012,15€	-1 820,08
Totais					-2 693,60€

No âmbito desta opção, a poupança total anual gerada no primeiro ano após a implementação solução preconizada ascende a 29 662,02€, sendo que destes, 26 968,42€ referem-se a poupanças resultantes da instalação de novos equipamentos, ou seja poupanças relacionadas com o consumo de energia elétrica e 2 693,60€ são referentes ao ajuste da potência contratada.

³⁹ Os preços por kWh considerados resultaram da média dos valores efetivamente pagos entre Novembro de 2011 e Dezembro de 2012 e constam das faturas emitidas neste período por parte do distribuidor de energia.

5.3.2. Opção 2 – Substituição do Sistema de Retificação na subestação de Montarroio

Esta opção, designada por Opção 2, apenas contabiliza a substituição e remodelação do equipamento de retificação e órgãos de proteção, na subestação de Montarroio, excluindo por isso qualquer intervenção na subestação do Calhabé. O ajuste da Potência Contratada está apenas contabilizada na subestação intervencionada.

Analogamente ao efetuado para a Opção 1 apresenta-se seguidamente os custos e descrição dos equipamentos e trabalhos, bem como a poupança energética e financeira decorrente da instalação e poupança resultante do ajuste da Potência Contratada.

5.3.2.1.– Custos e descrição dos equipamentos e trabalhos a efetuar na Opção 2

O valor total desta opção deste investimento é bastante inferior ao da *Opção 1*, isto resulta de apenas se estar a investir na subestação de Montarroio, conforme já se referiu. O investimento desta opção ascende a 86 187,90€. Os trabalhos e os equipamentos a instalar e a efetuar encontram-se discriminados na tabela (5.8)

Tabela 5.8 – Investimento *Opção 2* - Custos e descrição dos equipamentos e trabalhos a efetuar

Cap.	I – Subestação de Montarroio
1.1	Entrada de energia – Fornecimento e instalação de:
1.1.1	Cela de entrada de energia tipo SM6 IM 17,5KV - 16KA, equipada com interruptor - seccionador - seccionador de terra em SF6, com comando CIT manual, Cela de medida tipo SM6 GBCB 17,5KV - 16KA, para TI + TT e entrada e saídas superiores por barras, cela proteção, equipada com disjuntor SM6 DM1C 17,5KV 20KA, e disjuntor SF Set comando manual, seccionador a jusante e canalizações elétricas de média e baixa tensão, para corrente DC.
1.2	Grupo Transformador/Retificador - Fornecimento e instalação de:
1.2.1	Retificador de tração 450kW/650Vdc e Transformador do Tipo Seco 500kVA (ambos equipamentos preparados para uma sobrecarga máxima admissível de acordo com a classe VI - 1,5 In durante 2 horas e 3 In durante 1 minuto -)
1.3	Outros trabalhos e fornecimentos:
1.3.1	Fornecimento e instalação de Quadro elétrico de distribuição de Corrente Contínua.
1.3.2	Execução de trabalhos de alteração do traçado aéreo para subterrâneo, na subestação de Montarroio, na interligação entre a subestação e a Rede de Tração.
Custo Total do Investimento da Opção 2	
86.167,90€	

5.3.1.2.– Poupança Energética e Financeira decorrente da implementação da Opção 2

Também aqui recorreu-se aos dados indicados na secção 4.6.1.1 que resultaram dos dados de faturação de energia por parte do comercializador, mas apenas para a subestação de Montarroio. Nestes dados estão contemplados os consumos de energia ativa dentro dos respetivos ciclos horários.

Na tabela (5.9) encontra-se indicado o consumo anual na subestação de Montarroio.

Tabela 5.9 – Consumos energéticos anuais verificados antes da implementação da *Opção 2*

	Consumos Energia Ativa (kWh)				
	Super Vazio	Vazio Normal	Ponta	Cheias	Totais
Sub. Montarroio	10 979	51 446	93 658	284 116	440 199
Totais	10 979	51 446	93 658	284 116	440 199

Com a implementação desta opção, obter-se-á também uma redução efetiva no consumo de energia. Na tabela (5.10) evidenciam-se os consumos energéticos anuais estimados após a implementação da *Opção 2*.

Tabela 5.10 – Consumos energéticos anuais estimados com a implementação da *Opção 2*

	Consumos Energia Ativa (kWh)				
	Super Vazio	Vazio Normal	Ponta	Cheias	Totais
Sub. Montarroio	5 616	26 316	47 909	145 335	225 177
Totais	5 616	26 316	47 909	145 335	225 177

Da diferença entre as tabelas (5.9) e (5.10) chega-se à poupança de energia estimada e que se indica na tabela (5.11) e que no total ascende a 215 022 kWh.

Tabela 5.11 – Poupança energética anual estimada pela implementação da *Opção 2*

	Consumos Energia Ativa (kWh)				
	Super Vazio	Vazio Normal	Ponta	Cheias	Totais
Sub. Montarroio	-5 363	-25 130	-45 749	-138 781	-215 022
Totais	-5 363	-25 130	-45 749	-138 781	-215 022

Também nesta solução a poupança anual estimada no consumo de energia tem implicações diretas numa poupança financeira. Para o cálculo desta poupança, e analogamente ao efetuado para a *Opção 1* procedeu-se a afetar os consumos diferenciados (dentro do ciclo horário) ao custo unitário de energia respetiva. Os valores considerados também resultaram da média entre o custo e o consumo efetuado no período analisado de um ano e constantes das respetivas faturas de energia. A poupança financeira anual estimada e resultante da implementação desta opção é de 20 549,53€.

Na tabela (5.12) é apresentado os valores resultantes desta poupança, discriminados pelo respetivo ciclo horário.

Tabela 5.12 – Poupança nos consumos energéticos estimada resultante da implementação da *Opção 2*

	Poupança Anual (€)				
	Super Vazio	Vazio Normal	Ponta	Cheias	Totais
Sub. Montarroio	-299,15	-1.518,41	-5.744,64	-12.987,33	-20.549,53
Totais	-299,15	-1.518,41	-5.744,64	-12.987,33	-20.549,53

A este valor acresce ainda a poupança com custos por kWh tido com o termo de potência em horas de ponta, que nesta situação será de que foi de 3 202,43€. A poupança total é assim de 23 751,96€.

5.3.2.3.– Poupança resultante do ajuste da Potência Contratada

Conforme o já apresentado na *Opção 1*, também qui se preconiza o ajuste da potência contratada, neste contexto apenas na subestação de Montarroio.

Com esta alteração na Potência Contratada nesta subestação, a poupança anual estimada ascenderá a 873,52€, conforme se viu e indicou na tabela (5.6) antes e depois do ajuste.

No âmbito desta opção, a poupança total anual gerada no primeiro ano após a implementação solução preconizada ascende a 24 625,48€, sendo que 23 751,96€ se referem a poupanças resultantes da instalação de novos equipamentos, ou seja poupanças relacionadas com o consumo de energia elétrica e 873,52€ referentes ao ajustada potência contratada em ambas subestações.

Em resumo, a *Opção 1* é aquela que cujo investimento é mais elevado, mas o poupança anual total atingida também é maior. Por seu lado, a *Opção 2* preconiza uma menor poupança anual total mas o seu investimento também é inferior ao da *Opção 1*.

Só uma análise, agora sob o ponto de vista financeiro indicará qual destas opções é será mais rentável, na ótica investimento versus retorno financeiro.

Na tabela (5.13) encontram-se resumidas as poupanças financeiras resultantes da implementação de cada uma das opções.

Tabela 5.13 – Resumo da poupança em cada uma das opções apresentadas

	Investimento (€)	Poupança anual total gerada (€)
Opção 1	123.835,90€	29 662,02€
Opção 2	86.167,90€	23 751,96€

5.4. Parâmetros Financeiros Utilizados na Análise de Investimentos

O princípio da avaliação de um projeto de investimentos tem a sua base na comparação entre as receitas geradas por um investimento efetuado, num determinado período de tempo, mais ou menos longo e as respetivas despesas que se teve com este. [44]

Ao longo dos tempos o progresso nas técnicas de gestão, a racionalização crescente das decisões e as transformações das mentalidades e da própria sociedade em geral, alterou a forma de avaliar um investimento que noutros tempos se regia com base na intuição. [44]

Atualmente existem vários métodos de análise de investimentos. Genericamente, estes métodos baseiam-se no cálculo de parâmetros financeiros que nos dão indicação sobre o investimento em questão. Muitas das vezes, o cálculo de um só parâmetro não dá por si só toda a informação necessária sobre o investimento ou investimentos que se pretendem efetuar, sendo necessário analisar mais do que parâmetro a poder-se fazer uma análise mais realista dos investimentos em questão.

Seguidamente apresentam-se as necessárias noções teóricas dos parâmetros financeiros mais utilizados na análise de investimentos.

5.4.1. Valor atual e Valor atual Líquido

Quando se adquire um determinado bem (investimento) que em vez de consumo imediato, se destina a produzir um determinado valor no futuro (renda), um dos objetivos da parte do investidor é precisamente conhecer esse valor. Deste modo podemos definir este objetivo como a procura de ativos reais que valem mais do que seu custo. [44]

O Valor Atual (VA) define qual o valor, no presente, de uma receita ou despesa realizada no futuro. Um euro disponível hoje vale mais do que um euro disponível amanhã. Neste sentido é possível comparar as receitas e despesas previsionais geradas por um projeto de investimentos, referindo-as a um mesmo período que normalmente é o momento da decisão de investir, ou seja o Ano 0. [6]

O Valor Atual de um recebimento futuro pode ser obtido, multiplicando esse recebimento por um fator ou taxa, denominada de Atualização (TA), que é menor do que 1 (se assim não fosse, um euro disponível hoje valeria menos do que um euro disponível no futuro). [44]

Considerando um determinado recebimento esperado no final do período 1 (um ano a partir da data de hoje), C_1 e uma TA então o valor atual, (VA) é dado por: [44]

$$VA = TA \cdot C_1 \quad (5.1)$$

A taxa de atualização pode ser expressa em função da taxa de rendibilidade, r , através de seguinte equação (5.2): [44]

$$TA = \frac{1}{1+r} \quad (5.2)$$

Esta taxa de rendibilidade, r , corresponde ao prémio que quem investe exige pela aceitação de um recebimento adiado, e é muitas vezes designado por taxa mínima de rendibilidade, custo de oportunidade do capital ou, simplesmente taxa de juro. O cálculo do valor atual do projeto de investimento é feito pela atualização dos recebimentos futuros esperados à taxa de rendibilidade oferecida por alternativas de investimentos comparáveis. [44]

Generalizando para um ano t uma taxa de rendibilidade, r_t e um fluxo de tesouraria C_t , o valor atual TA para n anos é dado pela seguinte equação: [44]

$$VA = \sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1+r_t)^t} \quad (5.3)$$

O valor atual de um dado projeto, é equivalente aos fluxos de tesouraria (ou fluxos financeiros, ou ainda denominado de cash flow) atualizados para n anos.

O valor atual líquido (VAL) é obtido subtraindo o valor do investimento inicial, ou de outra forma, adicionando um valor negativo de fluxo de tesouraria no ano zero ($t=0$) referente ao montante do investimento, ou momento inicial, C_0 ao valor atual, tal como se pode verificar na equação seguinte: [44]

$$VAL = C_0 + VA = C_0 + \sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1+r_t)^t} \quad (5.4)$$

Pode haver uma taxa de juro diferente para cada período futuro. Esta relação entre a taxa de juro e a maturidade do fluxo de tesouraria denomina-se estrutura temporal das taxas de juro. No entanto pode assumir-se que a estrutura temporal é horizontal, isto é, que a taxa de juro é a mesma durante todo o período temporal do investimento independentemente da maturidade dos fluxos de tesouraria.

Assim, a série das taxas de juro r_1, r_2, \dots, r_n , pode ser substituída por uma simples taxa r , o que permite simplificar a equação (5.4), passando deste modo o VAL a definir-se por: [44]

$$VAL = C_0 + \sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1+r)^t} \quad (5.5)$$

5.4.2. Taxas de Juro Nominal e Real

Se num depósito bancário forem investidos 1 000€, com uma taxa de juro de 10%, o banco promete pagar 1 100€. Contudo não faz qualquer promessa sobre o que se poderá comprar com esse dinheiro, isto dependerá sempre da inflação em cada ano.

De fato, se os preços dos bens e serviços aumentarem mais de 10%, perder-se-á a mais-valia ganha neste depósito, isto em termos do poder de compra real dos bens e serviços que entretanto venhamos a necessitar.

Há vários índices para representar a evolução do nível geral dos preços, sendo o mais conhecido o Índice de Preços no Consumidor (*IPC*). Este índice mede a quantidade de dinheiro necessário para pagar um cabaz de compras de uma família típica. A variação do IPC de um ano para o seguinte é a Taxa de Inflação (*TI*). [44]

Quando uma entidade bancária ou semelhante anuncia uma dada taxa de juro, está a indicar uma taxa de juro nominal. A taxa permite saber a rapidez com que o dinheiro vai crescer.

Supondo que uma dada entidade bancária ou semelhante anuncia uma taxa de juro de 10% num dado produto financeiro e que a taxa de inflação seja de 6%, ter-se-á, em termos de poder de compra apenas mais 3,774% no fim de período do que se tem no início. [44]

Podemos dizer então que neste caso o produto bancário proporciona uma taxa de rendibilidade nominal de 10% ou uma taxa de rendibilidade esperada ou real de 3,774%. [44]

Para uma dada taxa de inflação TI e uma taxa de juro nominal r_n , a taxa de rendibilidade real, r_r é dada pela seguinte expressão: [44]

$$r_r = \frac{r_n - TI}{1 + TI} \quad (5.6)$$

Analogamente, pode-se converter uma taxa de atualização nominal TA_n , numa taxa de atualização real TA_r , através da equação (5.7): [44]

$$TA_r = \frac{1 + TA_n}{1 + TI} - 1 \quad (5.7)$$

5.4.3. *Cash Flow*

Este termo refere-se à quantidade de dinheiro que é recebido e pago por um negócio durante um determinado período, por vezes associado a um determinado projeto específico [44].

A realização ou não de um projeto de investimentos depende essencialmente da sua rentabilidade futura, ou de outra forma, da capacidade deste gerar fluxos financeiros (receitas) num futuro mais ou menos próximo, de modo a cobrir as despesas efetuadas com a sua realização e funcionamento.[6]

Neste sentido há necessidade de apurar quais os fluxos gerados pela exploração do projeto que devem ser comparados com as despesas realizadas.

São a estes fluxos anuais ao longo do período de vida do projeto de investimentos que se convencionou chamar de *Cash Flow (CF)*. [44]

Os investimentos de modernização e inovação que têm como objetivo a diminuição de custos, para efeitos de apuramento do *Cash Flow*, são contabilizados em termos de economia de recursos financeiros que se obtêm com essa substituição. [44]

5.4.4. Tempo de Retorno do Investimento

O Tempo de Retorno do Investimento (*TRI*), não é mais do que o período necessário ao funcionamento do projeto para que o total dos fluxos de receitas e despesas iguale as despesas do investimento e destina-se a determinar o tempo de recuperação do capital investido, ou seja equivale ao tempo necessário para que as receitas geradas e acumuladas superem as despesas em investimento realizadas e acumuladas durante o tempo de vida do projeto. [44]

O investimento num projeto é tanto melhor quanto menor for o tempo de retorno do investimento (*TRI*). Projetos em que o *TRI* seja igual ou superior ao tempo de vida útil do projeto não são economicamente viáveis. [44].

5.4.5. Taxa Interna de Rentabilidade

A Taxa Interna de Rentabilidade (*TIR*) representa a taxa máxima de rendibilidade do investimento. Não é mais do que a taxa de atualização que, no final da vida útil do projeto iguala o *VAL* a zero. Na prática, procura-se o projeto com maior *TIR*, pois ela terá de ser maior do que a taxa de juro real.

Se a taxa interna de rentabilidade (*TIR*) for superior à taxa de juro real, então estamos diante de um projeto com um valor atual líquido (*VAL*) positivo, que significa que este é economicamente viável, mas se por outro lado o valor do *TIR* for inferior à taxa de juro real, o *VAL* desse projeto é negativo, logo não apresentando qualquer viabilidade económica [44].

5.5. Análise Económica do Investimento

Os dois métodos mais utilizados no estudo da análise económica de investimentos são o *VAL* e o *TIR*. Estes dois métodos são utilizados muitas vezes de forma complementar, pois respondem a necessidades de análise diferente. [44]

O *VAL* assenta na comparação do *Cash Flow (CF)* gerado por um projeto com o capital investido, atualizando os vários *cash flows* anualmente gerados ao seu valor atual correspondente. A determinação do *VAL* de um qualquer projeto requer as seguintes etapas: [44]

- Fixação da taxa de atualização (*TA*);
- Determinação do capital investido, caso o projeto necessite de várias despesas de capital durante vários períodos é necessário atualizar essas saídas de fundo para o ano 0 (ano o investimento);
- Cada *Cash Flow* é multiplicado pelo seu valor atual correspondente;
- A soma dos *cash flows* de investimento e o seu custo é igual *VAL*.

Diz-se que um determinado projeto de investimento é rentável quando o seu *VAL* é positivo ($VAL > 0$). [44]

Por sua vez, o método da *TIR*, consiste em determinar a taxa para a qual o *VAL* é igual a zero. Por outras palavras, é a taxa mais elevada a que um investidor pode contrair um empréstimo para financiar um investimento, sem perder dinheiro, ou ainda a taxa máxima que o investidor deve pagar para não perder dinheiro.

Em termos gerais a *TIR* permite apreciar projetos de forma imediata, selecionando os que se encontram acima de um valor estabelecido para a taxa de atualização (*TA*) e eliminando os outros que se situam a baixo desse nível. Quanto mais alta for esta taxa, maior é a rentabilidade de um dado projeto. [44]

Dois projetos podem ter o mesmo valor de *TIR* e diferentes *VAL*, dependendo da sua intensidade capitalística. Por outro lado, um dado projeto pode ter um *TIR* inferior a outro projeto, mas com um *VAL* superior.

Será a política financeira do investido que selecionará qual o projeto a executar em função das disponibilidades e das outras alternativas em estudo. [44]

No caso presente, este estudo debruçou-se sobre as duas primeiras opções, a *Opção 1* e *Opção 2*, que foram apresentadas na secção 5.3.

Contudo existe um fator que pode influenciar a opção de qualquer investimento, que é o aumento anual do tarifário de energia.

Para este efeito, foi tido em conta três cenários de aumento de energia elétrica.

- *Cenário 1* - Aumento nulo do preço de energia (0%/ano)
- *Cenário 2* - Aumento médio do preço de energia de 2%/ano;
- *Cenário 3* - Aumento médio do preço de energia de 4%/ano.

Para se efetuar esta análise, há que determinar alguns parâmetros económicos, nomeadamente a determinação do *CashFlow*⁴⁰.

O *CashFlow* (*CF*) é apurado pela soma dos Resultados Operacionais (*RO*) e os da Depreciação do Equipamento⁴¹ (*D*) que no que diz respeito a este tipo de investimentos, tem um horizonte de 10 anos. Assim temos:

$$CF=RO+D \quad (5.8)$$

Por sua vez os Resultados Operacionais (*RO*) são apurados pela subtração à Poupança Gerada (*PG*) dos Gastos de Exploração (*GE*) e da Depreciação (*D*).

$$RO=PG-GE-D \quad (5.9)$$

Cada um destes cenários contempla ainda uma taxa de atualização (*TA*) de 0%, 2%, 4% respetivamente.

Nas tabelas seguintes indicam-se para cada um dos cenários e taxas de atualização consideradas os valores calculados destes fatores.

Nos cenários em que se contemplou aumento do custo de energia elétrica, considerou-se ainda uma atualização dos Gastos de Exploração de 2% ao ano, que evidenciam um aumento dos produtos e meios necessários às manutenções.

As tabelas (5.32) e a tabela (5.33) resumem o cálculo efetuado, indicando para cada opção de investimento, respetivamente para a *Opção 1* e *Opção 2* os respetivos VAL e TIR a 10 anos.

⁴⁰ O Cash Flow também é denominado como Meio Liberto Brutos do Investimento

⁴¹ A Depreciação é o custo ou a despesa decorrentes do desgaste ou da obsolescência dos ativos imobilizados, como por exemplo máquinas, veículos, móveis, imóveis ou instalações. Para efeitos de *Depreciação* deste tipo de equipamentos é considerada uma taxa de 10%, de acordo com a Tabela 1 do Decreto-Regulamentar 25/2009 de 14 de setembro. Neste sentido o valor do equipamento a depreciar é de 10%/ano, sendo este valor fixo e não sofrendo qualquer atualização.

- Opção 1 de Investimento) – Cenário a) – Sem atualização do Preço de Energia

Tabela 5.14 – Determinação do *CashFlow* (CF) para o Cenário de Aumento de Energia de 0%

Atualização Energia		0%									
Ano	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Poupança Gerada (PG)	29.662,02€	29.662,02€	29.662,02€	29.662,02€	29.662,02€	29.662,02€	29.662,02€	29.662,02€	29.662,02€	29.662,02€	
Gastos Exploração (GE)	-2.500,00€	-2.500,00€	-2.500,00€	-2.500,00€	-2.500,00€	-2.500,00€	-2.500,00€	-2.500,00€	-2.500,00€	-2.500,00€	
Depreciação (D)	- 12.383,59€	-12.383,59€	-12.383,59€	-12.383,59€	-12.383,59€	-12.383,59€	-12.383,59€	-12.383,59€	-12.383,59€	-12.383,59€	
Resultados Operacionais (RO)=(PG) - (GE) - (D)	14.778,43€	14.778,43€	14.778,43€	14.778,43€	14.778,43€	14.778,43€	14.778,43€	14.778,43€	14.778,43€	14.778,43€	
Depreciação (D)	12.383,59€	12.383,59€	12.383,59€	12.383,59€	12.383,59€	12.383,59€	12.383,59€	12.383,59€	12.383,59€	12.383,59€	
Cashflow (CF)=(RO)+(D)	27.162,02€	27.162,02€	27.162,02€	27.162,02€	27.162,02€	27.162,02€	27.162,02€	27.162,02€	27.162,02€	27.162,02€	

Tabela 5.15 – Determinação do *CashFlow* (CF) atualizado para taxas de atualização (TA) de 0%, 2% e 4%

Taxa de Atualização	Ano									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0%	27.162,02€	27.162,02€	27.162,02€	27.162,02€	27.162,02€	27.162,02€	27.162,02€	27.162,02€	27.162,02€	27.162,02€
2%	27.162,02€	26.629,43€	26.107,29€	25.595,38€	25.093,51€	24.601,48€	24.119,10€	23.646,17€	23.182,52€	22.727,96€
4%	28.248,50€	29.378,44€	30.553,58€	24.146,94€	23.218,21€	22.325,20€	21.466,54€	20.640,90€	19.847,02€	19.083,67€

Tabela 5.16 – Mapa de Investimentos e de *CashFlow* (CF) atualizado para cada ano correspondente e respectivo TIR e VAL

TA	Ano 0	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6	Ano 7	Ano 8	Ano 9	Ano 10	TIR	VAL
0%	-123.835,90	27.162,02€	27.162,02€	27.162,02€	27.162,02€	27.162,02€	27.162,02€	27.162,02€	27.162,02€	27.162,02€	27.162,02€	17,60%	147.784,30€
2%	-123.835,90	27.162,02€	26.629,43€	26.107,29€	25.595,38€	25.093,51€	24.601,48€	24.119,10€	23.646,17€	23.182,52€	22.727,96€	15,84%	125.028,96€
4%	-123.835,90	28.248,50€	29.378,44€	30.553,58€	24.146,94€	23.218,21€	22.325,20€	21.466,54€	20.640,90€	19.847,02€	19.083,67€	15,74%	70.432,77€

Cenário b) – Atualização do Preço de Energia em 2% ao Ano

Tabela 5.17 – Determinação do *CashFlow* (CF) para o Cenário de Aumento de Energia de 2%

Atualização Energia	2%									
Ano	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Poupança Gerada (PG)	29.662,02€	30.255,26€	30.860,37€	31.477,57€	32.107,12€	32.749,27€	33.404,25€	34.072,34€	34.753,78€	35.448,86€
Gastos Exploração (GE)	-2.500,00€	-2.550,00€	-2.601,00€	-2.653,02€	-2.706,08€	-2.760,20€	-2.815,41€	-2.871,71€	-2.929,15€	-2.987,73€
Depreciação (D)	-12.383,59€	-12.383,59€	-12.383,59€	-12.383,59€	-12.383,59€	-12.383,59€	-12.383,59€	-12.383,59€	-12.383,59€	-12.383,59€
Resultados Operacionais (RO) = (PG) - (GE) - (D)	11.147,67€	11.618,30€	12.098,33€	12.587,97€	13.087,40€	13.596,82€	14.116,43€	14.646,43€	15.187,03€	15.738,45€
Depreciação (D)	12.383,59€	12.383,59€	12.383,59€	12.383,59€	12.383,59€	12.383,59€	12.383,59€	12.383,59€	12.383,59€	12.383,59€
Cashflow (CF) = (RO) + (D)	23.531,26€	24.001,89€	24.481,92€	24.971,56€	25.470,99€	25.980,41€	26.500,02€	27.030,02€	27.570,62€	28.122,04€

Tabela 5.18 – Determinação do *CashFlow* (CF) atualizado para taxas de atualização (TA) de 0%, 2% e 4%

Taxa de Atualização	Ano									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0%	27.162,02€	27.705,26€	28.259,37€	28.824,55€	29.401,04€	29.989,06€	30.588,85€	31.200,62€	31.824,64€	32.461,13€
2%	27.162,02€	27.162,02€	27.162,02€	27.162,02€	27.162,02€	27.162,02€	27.162,02€	27.162,02€	27.162,02€	27.162,02€
4%	27.162,02€	26.639,67€	26.127,37€	25.624,92€	25.132,14€	24.648,83€	24.174,81€	23.709,91€	23.253,95€	22.806,76€

Tabela 5.19 – Mapa de Investimentos e de *CashFlow* (CF) atualizado para cada ano correspondente e respetivo TIR e VAL

TA	Ano 0	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6	Ano 7	Ano 8	Ano 9	Ano 10	TIR	VAL
0%	-123.835,90	27.162,02€	27.705,26€	28.259,37€	28.824,55€	29.401,04€	29.989,06€	30.588,85€	31.200,62€	31.824,64€	32.461,13€	19,39%	173.580,64€
2%	-123.835,90	27.162,02€	27.162,02€	27.162,02€	27.162,02€	27.162,02€	27.162,02€	27.162,02€	27.162,02€	27.162,02€	27.162,02€	17,60%	117.793,39€
4%	-123.835,90	27.162,02€	26.639,67€	26.127,37€	25.624,92€	25.132,14€	24.648,83€	24.174,81€	23.709,91€	23.253,95€	22.806,76€	15,87%	76.558,32€

Cenário c) – Atualização do Preço de Energia em 4% ao Ano

Tabela 5.20 – Determinação do *CashFlow* (CF) para o Cenário de Aumento de Energia de 4%

Atualização Energia		0%									
Ano	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Poupança Gerada (PG)	29.662,02€	30.848,50€	32.082,44€	33.365,74€	34.700,37€	36.088,38€	37.531,92€	39.033,19€	40.594,52€	42.218,30€	
Gastos Exploração (GE)	-2.500,00€	-2.550,00€	-2.601,00€	-2.653,02€	-2.706,08€	-2.760,20€	-2.815,41€	-2.871,71€	-2.929,15€	-2.987,73€	
Depreciação (D)	-12.383,59€	-12.383,59€	-12.383,59€	-12.383,59€	-12.383,59€	-12.383,59€	-12.383,59€	-12.383,59€	-12.383,59€	-12.383,59€	
Resultados Operacionais (RO)=(PG) - (GE) - (D)	14.778,43€	15.914,91€	17.097,85€	18.329,13€	19.610,70€	20.944,59€	22.332,92€	23.777,89€	25.281,78€	26.846,98€	
Depreciação (D)	12.383,59€	12.383,59€	12.383,59€	12.383,59€	12.383,59€	12.383,59€	12.383,59€	12.383,59€	12.383,59€	12.383,59€	
Cashflow (CF)=(RO)+(D)	27.162,02€	28.298,50€	29.481,44€	30.712,72€	31.994,29€	33.328,18€	34.716,51€	36.161,48€	37.665,37€	39.230,57€	

Tabela 5.21 – Determinação do *CashFlow* (CF) atualizado para taxas de atualização (TA) de 0%, 2% e 4%

Taxa de Atualização	Ano									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0%	27.162,02€	28.298,50€	29.481,44€	30.712,72€	31.994,29€	33.328,18€	34.716,51€	36.161,48€	37.665,37€	39.230,57€
2%	27.162,02€	27.743,63€	28.336,64€	28.941,28€	29.557,78€	30.186,36€	30.827,27€	31.480,74€	32.147,03€	32.826,39€
4%	27.162,02€	27.210,10€	27.257,25€	27.303,49€	27.348,85€	27.393,34€	27.436,96€	27.479,75€	27.521,72€	27.562,88€

Tabela 5.22 – Mapa de Investimentos e de *CashFlow* (CF) atualizado para cada ano correspondente e respectivo TIR e VAL

T.A	Ano 0	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6	Ano 7	Ano 8	Ano 9	Ano 10	TIR	VAL
0%	-123.835,90	27.162,02€	28.298,50€	29.481,44€	30.712,72€	31.994,29€	33.328,18€	34.716,51€	36.161,48€	37.665,37€	39.230,57€	21,34%	204.915,19€
2%	-123.835,90	27.162,02€	27.743,63€	28.336,64€	28.941,28€	29.557,78€	30.186,36€	30.827,27€	31.480,74€	32.147,03€	32.826,39€	19,51%	141.185,44€
4%	-123.835,90	27.162,02€	27.210,10€	27.257,25€	27.303,49€	27.348,85€	27.393,34€	27.436,96€	27.479,75€	27.521,72€	27.562,88€	17,75%	94.253,32€

- Opção 2 de Investimento) – Cenário a) – Sem atualização do Preço de Energia

Tabela 5.23 – Determinação do *CashFlow* (CF) para o Cenário de Aumento de Energia de 0%

Atualização Energia	0%									
Ano	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Poupança Gerada (PG)	24.625,48€	24.625,48€	24.625,48€	24.625,48€	24.625,48€	24.625,48€	24.625,48€	24.625,48€	24.625,48€	24.625,48€
Gastos Exploração (GE)	-2.500,00€	-2.500,00€	-2.500,00€	-2.500,00€	-2.500,00€	-2.500,00€	-2.500,00€	-2.500,00€	-2.500,00€	-2.500,00€
Depreciação (D)	-8.616,79€	-8.616,79€	-8.616,79€	-8.616,79€	-8.616,79€	-8.616,79€	-8.616,79€	-8.616,79€	-8.616,79€	-8.616,79€
Resultados Operacionais (RO)=(PG) - (GE) - (D)	13.508,69€	13.508,69€	13.508,69€	13.508,69€	13.508,69€	13.508,69€	13.508,69€	13.508,69€	13.508,69€	13.508,69€
Depreciação (D)	8.616,79€	8.616,79€	8.616,79€	8.616,79€	8.616,79€	8.616,79€	8.616,79€	8.616,79€	8.616,79€	8.616,79€
Cashflow (CF)=(RO)+(D)	22.125,48€	22.125,48€	22.125,48€	22.125,48€	22.125,48€	22.125,48€	22.125,48€	22.125,48€	22.125,48€	22.125,48€

Tabela 5.24 – Determinação do *CashFlow* (CF) atualizado para taxas de atualização (TA) de 0%, 2% e 4%

Taxa de Atualização	Ano									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0%	22.125,48€	22.125,48€	22.125,48€	22.125,48€	22.125,48€	22.125,48€	22.125,48€	22.125,48€	22.125,48€	22.125,48€
2%	22.125,48€	21.691,65€	21.266,32€	20.849,33€	20.440,52€	20.039,73€	19.646,79€	19.261,56€	18.883,88€	18.513,61€
4%	23.010,50€	23.930,92€	24.888,16€	19.669,47€	18.912,95€	18.185,53€	17.486,09€	16.813,55€	16.166,87€	15.545,07€

Tabela 5.25 – Mapa de Investimentos e de *CashFlow* (CF) atualizado para cada ano correspondente e respetivo TIR e VAL

TA	Ano 0	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6	Ano 7	Ano 8	Ano 9	Ano 10	TIR	VAL
0%	-86.167,90	22.125,48€	22.125,48€	22.125,48€	22.125,48€	22.125,48€	22.125,48€	22.125,48€	22.125,48€	22.125,48€	22.125,48€	22,23%	135.086,90€
2%	-86.167,90	22.125,48€	21.691,65€	21.266,32€	20.849,33€	20.440,52€	20.039,73€	19.646,79€	19.261,56€	18.883,88€	18.513,61€	20,44%	116.550,99€
4%	-86.167,90	23.010,50€	23.930,92€	24.888,16€	19.669,47€	18.912,95€	18.185,53€	17.486,09€	16.813,55€	16.166,87€	15.545,07€	20,61%	71.512,74€

Cenário b) – Atualização do Preço de Energia em 2% ao Ano

Tabela 5.26 – Determinação do *CashFlow* (CF) para o Cenário de Aumento de Energia de 2%

2%										
Atualização Energia										
Ano	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Poupança Geração (PG)	24.625,48 €	25.117,99 €	25.620,35 €	26.132,76 €	26.655,41 €	27.188,52 €	27.732,29 €	28.286,94 €	28.852,67 €	29.429,73 €
Gastos Exploração (GE)	-2.500,00 €	-2.550,00 €	-2.601,00 €	-2.653,02 €	-2.706,08 €	-2.760,20 €	-2.815,41 €	-2.871,71 €	-2.929,15 €	-2.987,73 €
Depreciação (D)	-8.616,79 €	-8.616,79 €	-8.616,79 €	-8.616,79 €	-8.616,79 €	-8.616,79 €	-8.616,79 €	-8.616,79 €	-8.616,79 €	-8.616,79 €
Resultados Operacionais (RO) = (PG) - (GE) - (D)	13.508,69 €	13.951,20 €	14.402,56 €	14.862,95 €	15.332,54 €	15.811,53 €	16.300,09 €	16.798,43 €	17.306,74 €	17.825,21 €
Depreciação (D)	8.616,79 €	8.616,79 €	8.616,79 €	8.616,79 €	8.616,79 €	8.616,79 €	8.616,79 €	8.616,79 €	8.616,79 €	8.616,79 €
Cashflow (CF) = (RO) + (D)	22.125,48 €	22.567,99 €	23.019,35 €	23.479,74 €	23.949,33 €	24.428,32 €	24.916,88 €	25.415,22 €	25.923,53 €	26.442,00 €

Tabela 5.27 – Determinação do *CashFlow* (CF) atualizado para taxas de atualização (TA) de 0%, 2% e 4%

Ano										
Taxa de Atualização										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0%	22.125,48 €	22.567,99 €	23.019,35 €	23.479,74 €	23.949,33 €	24.428,32 €	24.916,88 €	25.415,22 €	25.923,53 €	26.442,00 €
2%	22.125,48 €	22.125,48 €	22.125,48 €	22.125,48 €	22.125,48 €	22.125,48 €	22.125,48 €	22.125,48 €	22.125,48 €	22.125,48 €
4%	22.125,48 €	21.699,99 €	21.282,68 €	20.873,40 €	20.471,99 €	20.078,30 €	19.692,18 €	19.313,48 €	18.942,07 €	18.577,80 €

Tabela 5.28 – Mapa de Investimentos e de *CashFlow* (CF) atualizado para cada ano correspondente e respectivo TIR e VAL

TA	Ano 0	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6	Ano 7	Ano 8	Ano 9	Ano 10	TIR	VAL
0%	-86.167,90	22.125,48 €	22.567,99 €	23.019,35 €	23.479,74 €	23.949,33 €	24.428,32 €	24.916,88 €	25.415,22 €	25.923,53 €	26.442,00 €	24,05%	156.099,93 €
2%	-86.167,90	22.125,48 €	22.125,48 €	22.125,48 €	22.125,48 €	22.125,48 €	22.125,48 €	22.125,48 €	22.125,48 €	22.125,48 €	22.125,48 €	22,23%	110.368,73 €
4%	-86.167,90	22.125,48 €	21.699,99 €	21.282,68 €	20.873,40 €	20.471,99 €	20.078,30 €	19.692,18 €	19.313,48 €	18.942,07 €	18.577,80 €	20,47%	76.502,45 €

Cenário c) – Atualização do Preço de Energia em 4% ao Ano

Tabela 5.29 – Determinação do *CashFlow* (CF) para o Cenário de Aumento de Energia de 4%

Atualização Energia	0%										
Ano	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Poupança Gerada (PG)	24.625,48€	25.610,50€	26.634,92€	27.700,32€	28.808,33€	29.960,66€	31.159,09€	32.405,45€	33.701,67€	35.049,74€	
Gastos Exploração (GE)	-2.500,00€	-2.550,00€	-2.601,00€	-2.653,02€	-2.706,08€	-2.760,20€	-2.815,41€	-2.871,71€	-2.929,15€	-2.987,73€	
Depreciação (D)	-8.616,79€	-8.616,79€	-8.616,79€	-8.616,79€	-8.616,79€	-8.616,79€	-8.616,79€	-8.616,79€	-8.616,79€	-8.616,79€	
Resultados Operacionais (RO) =(PG) -(GE) -(D)	13.508,69€	14.443,71€	15.417,13€	16.430,51€	17.485,46€	18.583,67€	19.726,89€	20.916,95€	22.155,73€	23.445,22€	
Depreciação (D)	8.616,79€	8.616,79€	8.616,79€	8.616,79€	8.616,79€	8.616,79€	8.616,79€	8.616,79€	8.616,79€	8.616,79€	
Cashflow (CF) =(RO) +(D)	22.125,48€	23.060,50€	24.033,92€	25.047,30€	26.102,25€	27.200,46€	28.343,68€	29.533,74€	30.772,52€	32.062,01€	

Tabela 5.30 – Determinação do *CashFlow* (CF) atualizado para taxas de atualização (TA) de 0%, 2% e 4%

Taxa de Atualização	Ano									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0%	22.125,48€	23.060,50€	24.033,92€	25.047,30€	26.102,25€	27.200,46€	28.343,68€	29.533,74€	30.772,52€	32.062,01€
2%	22.125,48€	22.608,33€	23.100,65€	23.602,63€	24.114,44€	24.636,29€	25.168,38€	25.710,90€	26.264,05€	26.828,05€
4%	22.125,48€	22.173,56€	22.220,71€	22.266,95€	22.312,31€	22.356,80€	22.400,42€	22.443,21€	22.485,18€	22.526,34€

Tabela 5.31 – Mapa de Investimentos e de *CashFlow* (CF) atualizado para cada ano correspondente e respetivo TIR e VAL

TA	Ano 0	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6	Ano 7	Ano 8	Ano 9	Ano 10	TIR	VAL
0%	-86.167,90	22.125,48€	23.060,50€	24.033,92€	25.047,30€	26.102,25€	27.200,46€	28.343,68€	29.533,74€	30.772,52€	32.062,01€	26,07%	182.113,95€
2%	-86.167,90	22.125,48€	22.608,33€	23.100,65€	23.602,63€	24.114,44€	24.636,29€	25.168,38€	25.710,90€	26.264,05€	26.828,05€	24,21%	129.788,87€
4%	-86.167,90	22.125,48€	22.173,56€	22.220,71€	22.266,95€	22.312,31€	22.356,80€	22.400,42€	22.443,21€	22.485,18€	22.526,34€	22,42%	91.192,89€

Tabela 5.32 – Resumo dos VAL⁴² e TIR da Opção 1 a 10 anos para os diversos cenários apresentados

Opção 1		Aumento de Energia (%/Ano)					
		0%		2%		4%	
TA	Investimento Inicial	TIR	VAL	TIR	VAL	TIR	VAL
0%	-123.835,90 €	17,60%	147.784,30 €	19,39%	173.580,64 €	21,34%	204.915,19 €
2%	-123.835,90 €	15,84%	125.028,96 €	17,60%	117.793,39 €	19,51%	141.185,44 €
4%	-123.835,90 €	15,74%	70.432,77 €	15,87%	76.558,32 €	17,75%	94.253,32 €

Tabela 5.33 – Resumo dos VAL e TIR da Opção 2 a 10 anos para os diversos cenários apresentados

Opção 2		Aumento de Energia (%/Ano)					
		0%		2%		4%	
TA	Investimento Inicial	TIR	VAL	TIR	VAL	TIR	VAL
0%	-86.167,90 €	22,23%	135.086,90 €	24,05%	156.099,93 €	26,07%	182.113,95 €
2%	-86.167,90 €	20,44%	116.550,99 €	22,23%	110.368,73 €	24,21%	129.788,87 €
4%	-86.167,90 €	20,61%	71.512,74 €	20,47%	76.502,45 €	22,42%	91.192,89 €

Da análise das Tabelas (5.32) e (5.33), ressalta desde logo, um fator importante numa possível decisão de investimento. Será prudente, face à realidade e conjuntura económica atual optar por uma solução com maior TIR, apesar da Opção 1 apresentar um melhor VAL. Neste sentido, a Opção 2 apresenta para todos os cenários estudados a melhor TIR.

Acresce ainda dizer que na Opção 1 o retorno do investimento efetuado acontece para taxas todas as taxas de atualização (TA), ao fim de 5 anos, enquanto na Opção 2, o retorno do investimento, também para todas as taxas de investimento, ao fim de 4 anos.

Destas tabelas resumo também se conclui que quanto maior for o aumento anual de energia, tanto o VAL, quer a TIR destes investimentos também são maiores. Como consequência disso, o retorno do investimento vai ser feito em menos tempo.

Face ao estudo apresentado, e sob o ponto de vista financeiro, a Opção 2 revela-se a melhor opção de investimento, uma vez que uma maior TIR em todos os cenários apresentados, o que face á realidade e conjuntura económica, nos parece mais aceitável.

⁴² O VAL e o TIR foram calculados com base na ferramenta matemática disponibilizada pelo programa do Microsoft Office 2010, EXCEL.

5.6. Conclusão

Este capítulo evidencia duas opções de investimento. Uma delas, a *Opção 1* assente na substituição dos equipamentos de retificação existentes nas duas subestações e no ajuste da potência contratada. Esta opção é aquela que representa um maior investimento, acarretando um custo de 123 835,90€ e a aquela que reflete também uma maior poupança no consumo de energia, que se estima que possa atingir anualmente cerca de 244 588 kWh. A poupança financeira resultante, no final do primeiro ano da implementação desta opção estima-se que ascenda a 29 662,02 €.

A outra opção de investimento, a *Opção 2* implica um menor investimento, resultado da substituição de equipamento apenas na subestação de Montarroio. Neste cenário apenas se contabiliza o ajuste da potência contratada na subestação intervencionada. A poupança no consumo de energia é mais baixa, mas estima-se que mesmo assim possa atingir anualmente cerca de 215 022 kWh. A poupança financeira resultante no final do primeiro ano da implementação desta opção ascende a 24 625,48€.

Sob o ponto de vista do investimento, tanto uma opção como outra são atrativas. Ambas apresentam um VAL a 10 anos substancialmente superior a zero. Neste contexto a *Opção 1* apresenta um VAL que varia entre 70 432,77 € e 204 915,19 € e uma TIR que variam entre 17,60% e 21,34%, consoante o cenário estudado. Por seu lado e no que diz respeito à *Opção 2*, esta apresenta um VAL que varia entre 71 512,74€ e 182 113,95€ e uma TIR que variam entre 22,23% e 26,07%, para cada um dos cenários apresentados.

Face ao estudo da viabilidade económica destes investimentos, com os pressupostos apresentados, conclui-se que sob o ponto de vista estritamente financeiro, a melhor opção de investimento é a *Opção 2*. Esta traduz para todos os cenários apresentados os melhores TIR. O retorno do investimento dá-se entre os 4 anos, conforme a taxa de atualização que se pretenda utilizar, mais ou menos conservadora.

Numa altura em que todos os investimentos devem ser criteriosamente pensados, este estudo é muito interessante pois ambas as opções de investimento, apresentam um retorno de investimento num espaço muito curto, com um importante benefício financeiro e ambiental contribuindo decisivamente na melhoria da eficiência energética da rede de tração de troleicarros da cidade de Coimbra

6. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

6.1. Conclusões

Este trabalho começou por apresentar na sua parte inicial a legislação aplicável à eficiência energética no setor dos transportes e evidenciou a ligação histórica que a cidade de Coimbra tem com a mobilidade elétrica. Esta primeira parte incluiu também a apresentação do estado de arte das viaturas troleicarro e dos sistemas de retificação/conversão AC-DC disponíveis, bem como a identificação de algumas características destes equipamentos ao nível da eficiência energética.

A segunda parte descreveu o sistema de troleicarros existente na cidade, as linhas atualmente em serviço, as suas características e analisaram-se os equipamentos de retificação existentes. Esta análise foi efetuada pelo estudo das solicitações de serviço das subestações, relativamente ao regime transitório e potências médias solicitadas diariamente, obtidas por monitorização. As monitorizações revelaram-se um ponto-chave, com vista a aferir os parâmetros de eficiência e de distorção harmónica de cada uma das subestações. A conjugação destes dados permitiu dimensionar os novos sistemas de retificação, adaptados à realidade atual do sistema de troleicarros da Cidade de Coimbra.

Complementarmente foi efetuada a análise aos custos energéticos verificados durante um ano, com base nas faturas emitidas pelo comercializador e referentes a cada uma das subestações. Esta análise de custos energéticos foi importante no auxílio à análise tecno-económica dos investimentos necessários para maximizar a eficiência energética das subestações que se apresentaram, sendo que duas delas implicam investimento em novos equipamentos.

Estas soluções, que visam a maximização da eficiência energética da rede de troleicarros da cidade de Coimbra, revelam-se muito interessantes e atrativas, sob o ponto de vista do investimento e consequentemente do seu retorno económico. Para além disto, os retificadores propostos, encontram-se preparados para responderem à duplicação de potência que possa eventualmente existir, como resultado do aumento do número de viaturas troleicarro em serviço.

Contudo e sob o ponto de vista financeiro uma delas, a *Opção 2* revela-se mais atrativa do que a *Opção 1*, tanto mais que preconiza um menor investimento e apresenta parâmetros financeiros, nomeadamente o *TIR* mais elevados do que a primeira opção, com o seu retorno de investimento a concretizar-se em cerca de quatro anos após a sua implementação.

Esta opção não traduz a potencialização da redução do consumo de energia elétrica que é possibilitada pela *Opção 1*. Recorde-se que com implantação desta opção o valor estimado na redução do consumo elétrico ascenderia a 244 588 kWh/ano, sendo a sua poupança estimada em 29 662,02 €.

Mas, optando por aquela que sob o ponto de vista financeiro é a mais atrativa, ou seja a *Opção 2*, constata-se que mesmo assim sob o ponto de vista da melhoria da eficiência energética da rede de troleicarros da Cidade de Coimbra, esta não deixa de ser bastante interessante. Recorde-se que a sua implementação resultará numa redução do consumo de energia elétrica que se pode estimar em 215 022 kWh/ano, traduzindo uma poupança estimada global de 24 625,48€, repartidos respetivamente em 23 751,96€ no consumo direto de energia elétrica e de 873,52€ no ajuste da potência contratada. Esta redução nos custos terá reflexos quer nos custos variáveis, quer nos custos fixos que se apresentaram nas seções 4.5.1 e 4.5.2. Os custos totais com a fatura energética sofrerão deste modo uma redução de 27,13%.

Para além disso importa também referir que redução do consumo que a implementação da opção de investimento *Opção 2* permitirá anualmente evitar a emissão de Gases de Efeito de estufa em cerca de 101,1tCO_{2eq}⁴³.

A implementação desta solução traduz assim também uma significativa redução do custo de energia por cada 100 km percorridos. Importa informar que acordo com o Relatório de Gestão 2012 dos SMTUC⁴⁴ o custo por cada 100 km percorridos pelas viaturas troleicarro cifrou-se em 56,31€ enquanto para mesma distância o custo das viaturas a gasóleo foi de 56,91€, o que mesmo assim e face ao funcionamento de equipamentos que não são energeticamente eficientes⁴⁵ é assinalável. [13]

Esta redução no consumo de energia elétrica vai conduzir consequentemente à diminuição dos custos de energia (por cada 100 km percorridos), que se estimam que passarão de 56,31€/100 km para cerca de 41,02€/100 km, refletindo a redução de cerca 27,13%. Esta redução é traduzida de forma imediata, numa redução significativa com os custos de energia e consequentemente com os custos operacionais, decorrentes da exploração da rede de tração.

A redução apresentada com os custos de energia por cada 100 km percorridos leva também a um reflexo importante e que este trabalho também deu conta, que é a aposta na mobilidade elétrica na Cidade de Coimbra. Nos últimos anos, excetuando a aquisição da viatura *Skoda/Solaris*, a aposta na rede de troleicarros tem sido praticamente nula, sobretudo na procura e implementação de soluções energeticamente eficientes, em particular nas subestações de retificação.

Conforme este trabalho ajudou a comprovar, o caminho não será investir em novas viaturas troleicarro, sem antes se proceder a uma atualização tecnológica e de melhoria de eficiência energética das subestações de retificação existentes. Não será com toda a certeza o melhor caminho apostar em novas viaturas troleicarro quando existem equipamentos de retificação, nas subestações que têm rendimentos na casa dos 50% a 60%. Hoje em dia existem

⁴³ Para efeitos da contabilização da intensidade carbónica por emissão de gases com efeito de estufa, considera -se que o fator de emissão associado ao consumo de eletricidade é igual a 0,47 kgCO_{2e}/kWh, de acordo com o estabelecido na Portaria n.º 63/2008 de 21 de Janeiro, 1.ª Série.

⁴⁴ De acordo com o Relatório de Gestão de 2012, o custo de energia com a rede troleicarros foi de 93 290,00€, tendo sido percorridos 161 000 km. O custo apurado e indicado neste relatório foi de 56,31€/100 km.

⁴⁵ Em particular o caso dos equipamentos de retificação instalados na subestação de Montarroio.

equipamentos de retificação com rendimentos na casa dos 99,7%, o que não deixa de ser verdadeiramente notável.

A aposta em primeira-mão onde os consumos energéticos estão concentrados será a aposta acertada, e eles concentram-se nas subestações de retificação. Um bom desempenho energético destas leva a um bom desempenho do conjunto global do sistema.

Um outro aspeto importante e que importa salientar nos equipamentos de retificação e transformação é a sua “portabilidade”. De fato hoje em dia e face às dimensões extremamente compactas desses equipamentos, é facilmente possível deslocar-se uma subestação de um local para outro, como resultado de uma alteração eventual de um trajeto da rede de troleicarro ou uma eventual interação com outro meio de transporte. Neste sentido, o investimento nestes equipamentos não implica que futuramente o seu retorno de investimento fique comprometido com a introdução ou alteração de uma filosofia de transporte público, podendo estes equipamentos serem instalados noutro local. Esta pode ser uma realidade, face à possibilidade de introdução do metro de superfície em Coimbra, que levará obviamente a uma coordenação nos meios de transporte existentes na cidade.

Mas este assunto não se esgota por aqui. O passo seguinte passa por dotar a rede de viaturas mais eficientes e fará com que cada cêntimo gasto seja bem aproveitado, uma vez que esse investimento não se vai desvanecer “por efeito de Joule” em subestações ineficientes.

Em todo o mundo existem centenas de cidades cuja mobilidade é assente em redes de troleicarros e dezenas delas provavelmente sejam semelhantes à cidade de Coimbra, quer em dimensão, quer em termos de Centro Histórico.

Apesar do investimento inicial em viaturas troleicarro ser mais oneroso do que no caso de viaturas a diesel, mesmo assim as viaturas troleicarro apresentam uma grande vantagem que é terem um ciclo de vida substancialmente superior, poderem em percursos de descida, tão característicos da Cidade de Coimbra, gerar energia para a rede de tração, o que associado a custos de exploração e manutenção mais baixos, tornam hoje em dia esta aposta numa alternativa bastante atractiva sob o ponto de vista financeiro.

Por outro lado é assinalável o conforto proporcionado por esta nova geração de viaturas. Dotadas de aceleração constante, sem solavancos associado ao baixo ruído produzido, torna a utilização destas viaturas por parte do passageiro, numa experiência francamente confortável e agradável e este tem a consciência de que a sua mobilidade não provoca localmente qualquer tipo de emissões poluentes.

Por tudo isto, facilmente se percebe que apostar na mobilidade elétrica e em particular numa rede de troleicarros como a existente na nossa cidade é apostar no futuro, na sustentabilidade ambiental, na sustentabilidade financeira e na saúde, conforto e bem-estar das populações.

6.2. Trabalhos Futuros

Em termos de trabalhos futuros, este trabalho pode ser completado por outros, cujo objetivo passe por dar também um contributo significativo na redução de custos de exploração e na melhoria da eficiência energética, quer ao nível das viaturas troleicarro, quer ao nível das subestações, a saber:

- Ao nível das viaturas troleicarro
 - Averiguação da possibilidade de alteração nos sistemas de tração existentes. (substituição de motores DC por motores de indução ou de imanes permanentes).
 - Alteração dos sistemas de controlo existentes por outros mais eficientes do tipo *conversor DC-DC* ou *Inversor de Tensão* e a possibilidade de recuperação da energia.
 - Instalação de sistemas híbridos de acumulação de energia, tais como supercondensadores e de baterias de lítio com alta densidade de potência
- Ao nível das subestações
 - Integração de fontes de energias renováveis nas subestações, incluindo o seu armazenamento para fazer face a períodos de “picos” de consumo.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Direção Geral de Energia e Geologia [online]. Disponível em: www.dgeg.pt (Acedido em 03.09.2013).
- [2] EDP Serviço Universal [online]. Disponível em: <http://www.edpsu.pt/pt/origemdaenergia/Pages/OrigensdaEnergia.aspx> (Acedido em 05.05.2013).
- [3] Direção Geral de Energia e Geologia, “*A Fatura Energética Portuguesa 2011*”, nº 27 – abril de 2012.
- [4] *Emissão de gases com efeito de estufa (potencial de aquecimento global): total e por alguns sectores de emissão de gases* [online]. Disponível em: [http://www.pordata.pt/Portugal/Potencial+de+efeito+de+estufa+total+e+por+alguns+sectores+de+actividade+economica+\(R\)-1077](http://www.pordata.pt/Portugal/Potencial+de+efeito+de+estufa+total+e+por+alguns+sectores+de+actividade+economica+(R)-1077) (Acedido em 05.04.2013).
- [5] GARDÉ, EMÍDIO H DOS MARTIRES, “*Troleicarro: O Transporte do Século XXI*” Tese de Mestrado, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, Portugal, maio de 2007.
- [6] ANIBAL T. DE ALMEIDA, CARLOS INVERNO, J. LOPES DE ALMEIDA, J. ALFREU SÁ MARQUES, BRUNO SANTOS, “*Small-hidropower integration in a multiple-propose dam-bridge for sustainable urban mobility*”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 15, Issue 9, December 2011
- [7] PERUGIO, ADOLFO, VAN GROOTVELD, GEERT; SCHOLZ, HARALD; “*Present and Future Role of Battery Electrical Vehicles in Private and Public Urban Transportation*” – Chapter 1 [online]. Disponível em: <http://www.intechopen.com/books/new-generation-of-electric-vehicles>
- [8] Presidência do Conselho de Ministros “*Estratégia Nacional para a Energia*”, Presidência do Conselho de Ministros, Resolução de Ministros 29/2010, Diário da República, 1ª Série – nº 73 de 15 abril de 2010.
- [9] SILVA, LUIS “*Estratégia Nacional para a Energia (ENE 2020)*”, Associação Industrial Portuguesa - 6º workshop da Plataforma do Empreendedor, julho 2010.
- [10] Presidência do Conselho de Ministros “*Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética (PNAEE 2016) e Plano Nacional de Ação para as Energias Renováveis (PNAER 2020)*”, Presidência do Conselho de Ministros, Resolução de Ministros 20/2013, Diário da República, 1ª Série – nº 70 de 10 abril de 2013.

- [11] Pacto de Autarcas, *Compromisso com as energias sustentáveis locais* [online]. Disponível em: http://www.pactodeautarcas.eu/index_pt.html (Acedido em 06.09.2013).
- [12] ORDEM DOS ENGENHEIROS – Região Centro, “*Troleicarros de Coimbra: 60 Anos de História*”, outubro de 2007.
- [13] SMTUC – *Relatório de Gestão e Documentos Financeiros 2012* – Abril de 2013.
- [14] ZHENG, LIANG; “*Investigation and Analysis of the Mechanical Behaviors of the Electrical Vehicles*” - Chapter 9 [online]. Disponível em: <http://www.intechopen.com/books/new-generation-of-electric-vehicles>
- [15] AL SAKKA, MONZER; GUALOUS, HAMID; OMAR, NOSHIN; MIERLO, JOERI VAM; *Batteries and Supercapacitors for Electric Vehicles*” - Chapter 5 [online]. Disponível em: <http://www.intechopen.com/books/new-generation-of-electric-vehicles> (Acedido em 09.12.2013).
- [16] PEREIRINHA, PAULO G; TROVÃO, J. PAULO; “*Multiple Energy Sources Hybridization: The Future of Electric Vehicles?*” - Chapter 8 [online]. Disponível em: <http://www.intechopen.com/books/new-generation-of-electric-vehicles>
- [17] STEVIC, ZORAN, RADOVANOVIC, ILIJA; “*Energy Efficiency of Electric Vehicles*” - Chapter 4 [online]. Disponível em: <http://www.intechopen.com/books/new-generation-of-electric-vehicles>
- [18] REINHART, KÜHNE “*Electric Buses – An efficient urban transportation means*” Energy, Volume 35, Issue 12, December 2010.
- [19] CEGELEC – *The main economic advantages between chopper and inverters in trolleybuses*, 1st International Worksop to Push Forward Your Trolleybus System, Salzburg, Austria, April 20, 2006 [online]. Disponível em: http://www.trolley-motion.ch/fileadmin/user_upload/documents/uitp/Vytous_Cegelec.pdf (Acedido em 16.09.2013).
- [20] Trolley-motion, *Troleicarro: Um sistema de trânsito urbano inteligente* [online]. Disponível em: http://www.trolley-motion.ch/fileadmin/user_upload/documents/TrolleyMotion_pt.pdf (Acedido em 16.09.2013).
- [21] Trolley-motion [online]. Disponível em: <http://www.trolley-motion.eu> (Acedido em 16.09.2013).
- [22] FULLER, JR, *Trolleybuses – transport of the future* [online]. Disponível em: http://www.trolley-motion.ch/fileadmin/user_upload/documents/Trolleybuses_eurobus_2006.pdf, Expo 2006 Conference, Birmingham, 7 a 9 de novembro 2006 (Acedido em 16.09.2013).

- [23] BROWN, KEVIN, “*The Benefits of Clean, Quiet Emissions-Free Transit Service: Promoting the Trolleybus in Vancouver*” [online]. Disponível em <http://www.tbush.org.uk/vtpn3.pdf> (Acedido em 09.12.2013).
- [24] ARTURO GONZÁLEZ-GIL, ROBERTO PALACIN, PAUL BATTY; “*Sustainable urban rail systems: Strategies and technologies for optimal management of regenerative braking energy*”, Energy Conversion and Management, Volume 75, November 2013
- [25] Trolleybus [online]. Disponível em: <http://www.tbush.org.uk/orders.htm> (Acedido em 16.09.2013).
- [26] L, BESSONOV, *Eletricidade aplicada para engenheiros*, Edições Lopes da Silva, 1977.
- [27] ALMEIDA, TRAÇA; *Manual da Qualidade de Serviço* [online]. Disponível em: <http://www.edpdistribuicao.pt/pt/autarquia/qualidade/documentacao/Pages/qualidadedaEnergiaElectrica.aspx> (Acedido em 16.09.2013).
- [28] TROVÃO, JOÃO P.F.; FERREIRA, FERNANDO T.E, *Distorção harmónica no setor industrial – Causas Efeitos e Soluções* – Artigo técnico publicado Revista Manutenção, nº88 – 1º trimestre de janeiro a março de 2006.
- [29] RASHID, MUHAMAD H., *Power Electronics, circuits, Devices, and Applications*; New Jersey, Prentice-Hall Inc., 1996.
- [30] TROVÃO, JOÃO P.F, “*Sistema Integrado de monitorização e Análise da Distorção Harmónica – Uma Abordagem Sistemática para o Setor Industrial*” Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, FCT Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal, abril de 2004.
- [31] IEEE STD. 519-1992, *IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*, IEEE Industry Applications Society/Power Engineering Society.
- [32] SMTUC – *Carta de Missão 2012 – SIADAP 2* [online]. Disponível em: <http://www.smtuc.pt/smtuc/documentos/outros/index.php> (Acedido em 16.10.2013).
- [33] Quali.PT Segurança Alimentar [online]. Disponível em: <http://www.quali.pt/contaminantes/1558-mercúrio-hg> (Acedido em 16.11.2013).

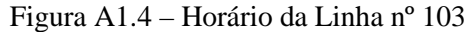
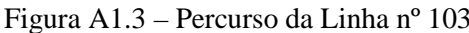
- [34] MATOS, ANA C. BORLIDO; MORAIS, LILIANA F. DIAS; MARTINS, MARA, L. ALA, “*Mercúrio*” Disciplina de Toxicologia Mecanística, - Unidade curricular do Curso de Mestrado Integrado em Ciências Farmacêuticas da Faculdade de Farmácia da Universidade do Porto (FFUP) – Orientação e responsabilidade pedagógica e científica do Prof. Doutor Fernando Remião, atualizado dezembro de 2007 [online]. Disponível em: http://www.ff.up.pt/toxicologia/monografias/ano0708/g1_mercurio/index.html (Acedido em 16.11.2013).
- [35] United States Enviromental Protection Agency [online]. Disponível em: <http://www.epa.gov/hg/effects.htm#elem=> (Acedido em 16.11.2013).
- [36] ORCHARD, FREDERICK CHARLES;”*Mercury arc rectifiers practice*” Chapman & Hall ltd, 1935.
- [37] HEWITT, PETER COOPER [online]. Disponível em: http://en.wikipedia.org/wiki/Peter_Cooper_Hewitt (Acedido em 16.11.2013).
- [38] REIS, ANA TERESA L.M. PEREIRA, “*Impacto do mercúrio na saúde humana: Aveiro como caso de estudo* ” Tese de Mestrado, Departamento de Química, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal, 2008.
- [39] VEIGA, ALEXANDRA; LOPES, ANA; REIS, CARRILHO, ELISA; SILVA, LUBÉLULA; DIAS, MANUEL B; SEABRA, MARIA J.; FERNANDES, PAAULO; NUNES, SOFIA; FERREIRA, SÓNIA, *Perfil de Risco dos principais alimentos consumidos em Portugal*” Autoridade de Segurança Alimentar e Económica, - Direção de Avaliação e Comunicação de Riscos, abril de 2009 e atualizado em março de 2012.
- [40] A.,FARO; D., GIORDANO;C.,SPAMPINATO; “*Integrating location tracking, traffic minotoring and semantics ins a layered ITS architecture* - Artigo técnico publicado em IET Intelligent Transport Systems - Revisto em dezembro de 2010.
- [41] E.CHIODO; D.LAURIA, “Probabilistic Description and Prediction of Electric Peak Power Demand” *Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion (ESARS), 2012*, vol., no., pp.1,7, 16-18 Oct. 2012
- [42] JIANGHAI HU; LYGEROS, J; PRANDINI, M; SASTRY, S., “A probabilistic Framework for Highway Safety Analysis,” *Decision and Control, 1999. Proceedings of the 38th IEEE Conference on*, vol.4, no., pp.3734,3739 vol.4, 1999
- [43] YIUANSU, JIANG; WENZHONG, TANG, “*Poisson Distribution-based Page Updating Prediccion Strategy*” – International Conference on Computer Science and Network Technology – 2011.
- [44] BARROS, HÉLIO, “*Análise de Projetos de Investimentos*; Edições Sílabo, 4ª Edição - 2002

ANEXO 1

Horários e Percursos da Linha nº 4 e Linha nº103

[illegible]

A1.2



ANEXO 2

Algoritmos de Cálculo do Equipamento de Monitorização Analisador da Chauvin Arnoux C.A.8334B

Os algoritmos que se transcrevem estão expressos no Manual de Utilização e são distribuídos juntamente com o equipamento de monitorização.

■ Valores eficaces de las tensiones y corrientes semiperiodo

$$V_{dem}[i] = \sqrt{\frac{1}{NechDemPer} \cdot \sum_{n: Z\acute{e}ro}^{Z\acute{e}ro\ s\acute{u}l\acute{o}v\acute{a}nt} V[i][n]^2} \quad \text{Tensi3n simple eficaz semiperiodo fase } i + 1$$

$$U_{dem}[i] = \sqrt{\frac{1}{NechDemPer} \cdot \sum_{n: Z\acute{e}ro}^{Z\acute{e}ro\ s\acute{u}l\acute{o}v\acute{a}nt} U[i][n]^2} \quad \text{Tensi3n compuesta eficaz semiperiodo fase } i + 1$$

$$A_{dem}[i] = \sqrt{\frac{1}{NechDemPer} \cdot \sum_{n: Z\acute{e}ro}^{Z\acute{e}ro\ s\acute{u}l\acute{o}v\acute{a}nt} A[i][n]^2} \quad \text{Corriente eficaz semiperiodo fase } i + 1$$

NECHPER : n3mero de muestras por periodo

n : muestras (0; 255) i : fase (0; 1; 2)

NechDemPer : relaci3n de muestras en el «l3bul3» considerado (entre dos ceros consecutivos)

■ Valores m3n-m3x para las tensiones y las corrientes

$$V_{max}[i] = \max(V_{dem}[i]), V_{min}[i] = \min(V_{dem}[i]),$$

$$U_{max}[i] = \max(U_{dem}[i]), U_{min}[i] = \min(U_{dem}[i]),$$

$$A_{max}[i] = \max(A_{dem}[i]), A_{min}[i] = \min(A_{dem}[i]), \text{ (c3lculo de Avg en 1 s : ver "Valores eficaces 1s...")}$$

■ Valores peak para las tensiones y las corrientes (reactualizadas en cada regeneraci3n de forma de onda)

$$V_{pp}[i] = \max(V[i][n]), V_{pm}[i] = \min(V[i][n]) \quad n \in [0 \dots NECHPER-1]$$

$$U_{pp}[i] = \max(U[i][n]), U_{pm}[i] = \min(U[i][n]) \quad n \in [0 \dots NECHPER-1]$$

$$A_{pp}[i] = \max(A[i][n]), A_{pm}[i] = \min(A[i][n]) \quad n \in [0 \dots NECHPER-1]$$

■ Factores de pico para las corrientes y las tensiones

$$V_{cf}[i] = \frac{\max(V_{pp}[i], V_{pm}[i])}{\sqrt{\frac{1}{NECHPER} \cdot \sum_{n=0}^{NECHPER-1} V[i][n]^2}} \quad \text{Factor de pico tensi3n simple fase } i + 1$$

$$U_{cf}[i] = \frac{\max(U_{pp}[i], U_{pm}[i])}{\sqrt{\frac{1}{NECHPER} \cdot \sum_{n=0}^{NECHPER-1} U[i][n]^2}} \quad \text{Factor de pico tensi3n compuesta fase } i + 1$$

$$A_{cf}[i] = \frac{\max(A_{pp}[i], A_{pm}[i])}{\sqrt{\frac{1}{NECHPER} \cdot \sum_{n=0}^{NECHPER-1} A[i][n]^2}} \quad \text{Factor de pico corriente fase } i + 1$$

■ Valores eficaces 1s de las tensiones y corrientes

$$V_{rms}[i] = \sqrt{\frac{1}{NechSec} \times \sum_{n: Z\acute{e}ro}^{NechSec-1} V[i][n]^2} \quad \text{Tensi3n simple eficaz fase } i + 1; V_{avg}[i] = V_{rms}[i]$$

$$U_{rms}[i] = \sqrt{\frac{1}{NechSec} \times \sum_{n: Z\acute{e}ro}^{NechSec-1} U[i][n]^2} \quad \text{Tensi3n compuesta eficaz fase } i + 1; U_{avg}[i] = U_{rms}[i]$$

$$Arms[i] = \sqrt{\frac{1}{NechSec} \times \sum_{n: Zero}^{NechSec-1} A[i][n]^2} \quad \text{Corriente eficaz fase } i+1; Aavg[i] = Arms[i]$$

$$Arms[3] = \sqrt{\frac{1}{NechSec} \times \sum_{n: Zero}^{NechSec-1} (A[0][n] + A[1][n] + A[2][n])^2} \quad \text{Corriente eficaz neutro; Aavg[3] = Arms[3]}$$

NechSec : Número de muestras en el segundo

■ Desequilibrios tensiones y corrientes

$$V_+ = \frac{1}{3} (VF[0] + a \cdot VF[1] + a^2 \cdot VF[2]) \quad \text{Tensión directa (notación compleja } a = e^{j\frac{2\pi}{3}})$$

$$V_- = \frac{1}{3} (VF[0] + a^2 \cdot VF[1] + a \cdot VF[2]) \quad \text{Tensión inversa}$$

$$Vunb = \frac{|Vrms_-|}{|Vrms_+|}, Aunb = \frac{|Arms_-|}{|Arms_+|}$$

■ Cálculos de la tasa global de distorsión armónico THD

$$Vthd[i] = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{50} Vharm[i][n]^2}}{Vharm[i][1]}, Uthd[i] = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{50} Uharm[i][n]^2}}{Uharm[i][1]}, Athd[i] = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{50} Aharm[i][n]^2}}{Aharm[i][1]}$$

i : fase (0; 1; 2)

n : rango (2...50)

■ Cálculo de los rangos armónicos (ver p 11 FT/2)

Por FFT (16 bits) 1024 puntos en 4 periodos (cf CEI 1000-4-7). A partir de las partes reales *b* e imaginarias *a*, se calculan las tasas para cada rango y para cada fase *Vharm[3][51]*, *Uharm[3][51]* y *Aharm[3][51]* en relación al valor fundamental y los ángulos *Vph[3][51]*, *Uph[3][51]* y *Aph[3][51]* en relación al rango de la fundamental.

Este cálculo se realiza según el siguiente principio:

$$\text{módulo en \%: } mod_k = \frac{C_k}{C_1} \times 100 \quad \text{ángulo en grados: } \varphi_k = \arctan\left(\frac{a_k}{b_1}\right)$$

$$\text{con } \begin{cases} c_k = |b_k + ja_k| = \sqrt{a_k^2 + b_k^2} \\ b_k = \frac{1}{512} \sum_{r=0}^{1024} F_r \times \sin\left(\frac{k\pi}{512} s + \varphi_k\right) \\ a_k = \frac{1}{512} \sum_{r=0}^{1024} F_r \times \cos\left(\frac{k\pi}{512} s + \varphi_k\right) \\ c_0 = \frac{1}{1024} \sum_{r=0}^{1024} F_r \end{cases}$$

c_k es la amplitud se componente de frecuencia $f_k = \frac{k}{4} f_1$
F_s señal muestreada
c₀ es la componente continua
k es le número ordinal (rango del espectro)

Multiplicando las tasas armónicas de tensión con las tasas armónicas de corriente se calculan las tasas armónicas de potencia. Con la diferencia entre los ángulos armónicos de tensión con los ángulos armónicos de corriente se calculan los ángulos armónicos de potencias.

VAharm[3][51] , VAph[3][51] (N.B. Únicamente disponible con C.A 8334B)

■ Cálculo del factor de distorsión (DF)

Se calculan dos valores globales que proporcionan la cantidad relativa de los armónicos: el THD en proporción de la fundamental y el DF en proporción al valor RMS.

$$Vdf[i] = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{50} V_{harm}[i][n]^2}}{V_{rms}[i]}, \quad Udf[i] = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{50} U_{harm}[i][n]^2}}{U_{rms}[i]}, \quad Adf[i] = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{50} A_{harm}[i][n]^2}}{A_{rms}[i]}$$

■ Factor K

$$Akf[i] = \frac{\sum_{n=1}^{n=50} n^2 \cdot A_{harm}[i][n]^2}{\sum_{n=1}^{n=50} A_{harm}[i][n]^2} \quad \text{Factor K para la fase } i + 1$$

■ Diferentes potencias 1s

$$W[i] = \frac{1}{NechSec} \cdot \sum_{n=0}^{NechSec-1} V[i][n] \cdot A[i][n] \quad \text{Potencia activa fase } i + 1$$

$$VA[i] = V_{rms}[i] \cdot A_{rms}[i] \quad \text{Potencia aparente fase } i + 1$$

$$VAR[i] = \frac{1}{NechSec} \cdot \sum_{n=0}^{NechSec-1} VF[i][n - NECHPER / 4] \cdot AF[i][n] \quad \text{Potencia reactiva fase } i + 1$$

$$o \quad VAR[i] = \sqrt{VA[i]^2 - W[i]^2} \quad \text{si método de cálculo armónicos}$$

$$\begin{aligned} W[3] &= W[0] + W[1] + W[2] & \text{Potencia activa total} \\ VA[3] &= VA[0] + VA[1] + VA[2] & \text{Potencia aparente total} \\ VAR[3] &= VAR[0] + VAR[1] + VAR[2] & \text{Potencia reactiva total} \end{aligned}$$

■ Diferentes tasas

$$PF[i] = \frac{W[i]}{VA[i]} \quad \text{Factor de potencia } i + 1$$

$$DPF[i] = \cos(\phi[i]) \quad \text{Factor de desplazamiento fase } i + 1$$

$$\tan[i] = \tan(\phi[i]) \quad \text{Tangente fase } i + 1$$

$$\cos(\phi[i]) = \frac{\sum_{n=0}^{NechSec-1} VF[i][n] \cdot AF[i][n]}{\sqrt{\sum_{n=0}^{NechSec-1} VF[i][n]^2} \cdot \sqrt{\sum_{n=0}^{NechSec-1} AF[i][n]^2}} \quad \text{Coseno ángulo entre tensión fundamental y corriente fase } i + 1$$

$$PF [3] = \frac{PF [0] + PF [1] + PF [2]}{3} \quad \text{Factor de potencia total}$$

$$DPF [3] = \frac{DPF [0] + DPF [1] + DPF [2]}{3} \quad \text{Factor de desplazamiento total}$$

$$\text{Tan} [3] = \frac{\text{Tan} [0] + \text{Tan} [1] + \text{Tan} [2]}{3} \quad \text{Tangente total}$$

■ Diferentes energías

1er caso : energías consumidas ($W [i] \geq 0$)

$$Wh [0] [i] = \sum_{Tint} \frac{W [i]}{3600} \quad \text{Energía activa consumida}$$

$$VAh [0] [i] = \sum_{Tint} \frac{VA [i]}{3600} \quad \text{Energía aparente consumida}$$

$$VARhL [0] [i] = \sum_{Tint} \frac{VAR [i]}{3600} \quad \text{por } VAR [i] > 0 = a \ 0 \quad \text{Energía reactiva capacitiva consumida}$$

$$VARhC [0] [i] = \sum_{Tint} \frac{-VAR [i]}{3600} \quad \text{por } VAR [i] < 0 = a \ 0 \quad \text{Energía reactiva inductiva consumida}$$

Energía activa consumida total

$$Wh[0][3] = Wh[0][0] + Wh[0][1] + Wh[0][2]$$

Energía aparente consumida total

$$VAh[0][3] = VAh[0][0] + VAh[0][1] + VAh[0][2]$$

Energía reactiva capacitiva consumida total

$$VARhC[0][3] = VARhC[0][0] + VARhC[0][1] + VARhC[0][2]$$

Energía reactiva inductiva consumida total

$$VARhL[0][3] = VARhL[0][0] + VARhL[0][1] + VARhL[0][2]$$

2do caso : energías generadas ($W [i] < 0$)

$$Wh [1] [i] = \sum_{Tint} \frac{W [i]}{3600} \quad \text{Energía activa generada}$$

$$VAh [1] [i] = \sum_{Tint} \frac{VA [i]}{3600} \quad \text{Energía aparente generada}$$

$$VARhL [1] [i] = \sum_{Tint} \frac{-VAR [i]}{3600} \quad \text{por } VAR [i] < 0 = a \ 0 \quad \text{Energía reactiva capacitiva generada}$$

$$VARhC [1] [i] = \sum_{Tint} \frac{VAR [i]}{3600} \quad \text{por } VAR [i] > 0 = a \ 0 \quad \text{Energía reactiva inductiva generada}$$

Energía activa generada total

$$Wh[1][3] = Wh[1][0] + Wh[1][1] + Wh[1][2]$$

Energía aparente generada total

$$VAh[1][3] = VAh[1][0] + VAh[1][1] + VAh[1][2]$$

Energía reactiva capacitiva generada total

$$VARhC[1][3] = VARhC[1][0] + VARhC[1][1] + VARhC[1][2]$$

Energía reactiva inductiva generada total

$$VARhL[1][3] = VARhL[1][0] + VARhL[1][1] + VARhL[1][2]$$